



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

**FEUP**

# **Materiais Compósitos Inteligentes**

**Carlos Augusto Xavier Ramos**

*Tese submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção  
do grau de Doutor em Ciências da Engenharia*

**Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Novembro / 2006**



**Aos meus pais**

**À minha esposa**

**À Ana Cristina**





## **Agradecimentos**

---

A realização do trabalho apresentado nesta dissertação não teria sido possível sem a colaboração de algumas pessoas e instituições, e a quem eu desejo exprimir o meu agradecimento.

Agradeço ao Professor Doutor António Torres Marques, a ao Professor Doutor Rui Silva, meu orientador e co-orientador, respectivamente, por me terem proposto este trabalho, e pelo apoio e disponibilidade que sempre demonstraram.

Agradeço ao Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI), em particular à Unidade de Materiais Compósitos (CEMACOM). A todos os colegas, desta unidade, pelo apoio dado, e em particular à Célia Novo, pelos conhecimentos na fabricação de materiais compósitos.

Agradeço ao INESC-Porto e à unidade de optoelectrónica, em particular ao Professor Doutor José Luís Santos, por me ter permitido trabalhar com alguns dos elementos da unidade e por me ter disponibilizado os meios do “mundo” dos sensores em fibra óptica.

Agradeço aos colegas e amigos Luís Esteves, Rui Oliveira pelo apoio e amizade que sempre demonstraram.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, por me conceder a possibilidade de realizar este trabalho.

Agradeço à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia, nomeadamente ao Programa Prodep III.



## Resumo

---

Nesta dissertação é apresentado o trabalho realizado sobre a investigação e desenvolvimento da implementação de sensores ópticos, nomeadamente o embebimento de redes de Bragg em fibra óptica, nos materiais compósitos laminados. Para tal, foram estudadas várias configurações de empilhamento do material compósito, fundamentalmente em laminados cruzados. Estes materiais possuem um conjunto de características muito atractivas, com vista a implementação da monitorização e actuação, em tempo real, em estruturas compósitas.

Foi apresentada uma nova configuração de uma cabeça sensora em material compósito laminado híbrido, capaz de medir pressões e temperaturas.

Foi implementada uma metodologia, para o embebimento dos sensores ópticos, em materiais compósitos laminados, em tecido cruzado, capaz de garantir bons resultados no espectro reflectido do sensor óptico, após a cura do material compósito, o mesmo se verificando quando a placa sensora em compósito se encontra sujeita a diferentes solicitações.

Foi, também, implementada esta metodologia, na realização de uma roseta óptica de forma triangular, o que possibilita ter três direcções em medição simultânea, com recurso a um único cabo de fibra óptica.

Por fim, foi concebida uma placa em material compósito, com o embebimento de dois sensores em fibra óptica, uma rede de Bragg e um interferómetro de Fabry-Pérot, e também com o embebimento de um piezoeléctrico, sendo o conjunto solicitado dinamicamente.

## Abstract

---

In this dissertation, it is presented the work carried out for the research and development regarding the implementation of optical fibre sensors, namely the embedding of fibre Bragg gratings in composite material laminates. For that purpose, some composite material lay-up configurations were studied, mainly in cross-ply laminate. These materials possess a set of very attractive characteristics, for the implementation of the monitoring and actuation, in real time, of composite structures.

It was presented a new configuration of a sensory head in hybrid composite material, capable to measure pressures and temperatures.

A methodology was implemented, for the embedding of the fibre Bragg gratings, in cross-ply composite laminate, capable to guarantee good results in the reflection spectrum of the optic fibre sensor, after the cure of the composite material, and also when the sensory plate is subjected to different loadings.

This methodology was also implemented in the manufacturing of an optic fibre rosette in a delta form, which permits the simultaneous strain measurement in three directions, with the use of a single optical fibre.

Finally, a composite material plate has been conceived, in which were embedded two optical fibre sensors, a fibre Bragg grating and an extrinsic Fabry-Pérot interferometer, and a piezoelectric transducer, being the set-up submitted to dynamic loading.

## Résumé

---

Dans cette dissertation est présenté le travail de recherche et développement d'implémentation de capteurs optiques, nommément l'insertion de réseaux de Bragg en fibres optiques, dans les matériaux composites stratifiés. Pour ça, ont été étudiées différentes séquences d'empilement du matériau composite, fondamentalement en stratifiés croisés. Ces matériaux possèdent un ensemble de caractéristiques très attractives, ayant en vue l'implémentation du suivi et de l'actuation, en temps réel, dans les structures composites.

Il a été présenté une nouvelle configuration de tête de capteur en matériau composite stratifié hybride, capable de mesurer pressions et températures.

Il a été implémenté une méthodologie d'insertion des capteurs à réseaux de Bragg dans des stratifiés croisés, capable d'assurer de bons résultats du spectre en réflexion du capteur optique, après la cuisson du matériau composite, et aussi quand la plaque se trouve soumise à différentes sollicitations.

Cette méthodologie a aussi été implémentée dans la réalisation d'une rosette optique en forme de delta, qui permet de mesurer les déformations en trois directions différentes, en simultanée, en ayant recours à un câble à fibre optique unique.

Finalement, il a été conçu une plaque en matériau composite, dans laquelle ont été insérés deux capteurs à fibre optique, un réseau de Bragg et un interféromètre de Fabry-Pérot, et un transducteur piézoélectrique, l'ensemble ayant été sollicité dynamiquement.



# Índice

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Agradecimentos.....      | I   |
| Resumo.....              | III |
| Abstract.....            | IV  |
| Résumé.....              | V   |
| Índice.....              | VII |
| Listagem de figuras..... | XI  |
| Listagem de tabelas..... | XVI |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 – Introdução .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 – Enquadramento e motivação.....                                       | 1         |
| 1.2 – Objectivos.....  | 5         |
| 1.3 – Organização da tese.....   | 7         |
| <b>2 – Materiais compósitos inteligentes.....</b>                          | <b>9</b>  |
| 2.1 – Introdução.....  | 9         |
| 2.1.1 – Campos de actuação dos materiais compósitos inteligentes.....      | 11        |
| 2.1.2 – Analogia com os seres biológicos.....                              | 14        |
| 2.1.3 – Compósitos inteligentes e a monitorização de integridade.....      | 15        |
| 2.1.4 – Monitorização e inspecção não destrutiva.....                      | 18        |
| 2.2 – Embebimento de sensores.....   | 20        |
| 2.2.1 – De fibra óptica.....   | 21        |
| 2.2.1.1 – Embebimento da fibra óptica.....                                 | 22        |
| 2.2.1.2 – De redes de Bragg e interferómetros.....                         | 23        |
| 2.2.1.2.1 – De redes de Bragg.....   | 24        |
| 2.2.1.2.2 – De interferómetros Fabry-Pérot.....                            | 24        |
| 2.2.2 – De Piezoeléctricos.....  | 25        |
| 2.2.2.1 – Efeito piezoeléctrico directo e inverso.....                     | 27        |
| 2.2.2.2 – Condicionantes dos piezoeléctricos.....                          | 28        |
| 2.3 – Outros sensores/actuadores utilizados em materiais inteligentes..... | 30        |
| 2.3.1 – Materiais e ligas com memória de forma.....                        | 30        |
| 2.3.2 – Fluidos electro-reológicos.....                                    | 33        |
| 2.3.3 – Materiais magnetorestritivos e electrorestritivos.....             | 34        |
| <b>3 – Materiais compósitos e métodos de produção.....</b>                 | <b>37</b> |
| 3.1 – Introdução.....  | 37        |
| 3.2 – As matrizes.....   | 39        |
| 3.3 – As fibras de reforço.....  | 41        |
| 3.4 – Os materiais pré-impregnados.....                                    | 43        |
| 3.4.1 – O interesse nos pré-impregnados.....                               | 45        |
| 3.5 – Os laminados.....  | 45        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.6 – Os compósitos sanduíche.....   | 47         |
| 3.6.1 – A construção de um compósito sanduíche.....  | 47         |
| 3.7 – Processos de fabrico de compósitos de matriz polimérica.....                             | 50         |
| 3.7.1 – Introdução.....  | 50         |
| 3.7.2 – Moldação manual.....   | 51         |
| 3.7.3 – Moldação manual assistida por vácuo.....   | 52         |
| 3.7.4 – Moldação em autoclave.....   | 52         |
| 3.7.5 – Moldação por prensa de pratos quentes.....   | 54         |
| 3.7.6 – Moldação por RTM (ou VARTM).....   | 55         |
| 3.8 – Propriedades mecânicas dos compósitos.....   | 56         |
| 3.9 – Algumas aplicações dos materiais compósitos.....   | 60         |
| 3.9.1 – Indústria aeroespacial.....  | 60         |
| 3.9.2 – Engenharia civil.....  | 61         |
| 3.9.3 – Energia eólica e estruturas marítimas.....   | 62         |
| 3.9.4 – Transportes aéreo, terrestre e marítimo.....   | 63         |
| 3.9.5 – Desporto.....  | 65         |
| 3.9.6 – Medicina.....  | 66         |
| 3.10 – Algumas das vantagens e desvantagens destes materiais.....                              | 67         |
| <b>4 – Sensores em fibras ópticas.....</b>   | <b>69</b>  |
| 4.1 – Introdução.....  | 69         |
| 4.2 – A fibra óptica: princípios.....  | 71         |
| 4.2.1 – Tipos de fibras ópticas.....   | 77         |
| 4.2.2 – Equações de propagação de ondas electromagnéticas na fibra óptica.....                 | 79         |
| 4.3 – Sensores em fibra óptica.....  | 81         |
| 4.3.1 – Sensores com modulação de intensidade.....   | 82         |
| 4.3.2 – Sensores com modulação de fase.....  | 82         |
| 4.3.3 – Sensores com modulação em comprimento de onda.....                                     | 83         |
| 4.3.4 – Algumas das vantagens e desvantagens dos sensores.....                                 | 84         |
| 4.3.4.1 – Algumas vantagens.....   | 84         |
| 4.3.4.2 – Algumas desvantagens.....  | 85         |
| 4.4 – Redes de Bragg.....  | 86         |
| 4.4.1 – O aparecimento das redes por fotossensibilidade.....                                   | 87         |
| 4.4.2 – Fundamentos das redes de Bragg.....  | 88         |
| 4.4.3 – A técnica da máscara de fase.....  | 93         |
| 4.4.4 – Multiplexagem de redes.....  | 94         |
| 4.4.5 – A birrefringência das redes.....   | 95         |
| 4.5 – Algumas das potenciais aplicações.....   | 96         |
| 4.6 – Interferómetros de Fabry-Pérot.....  | 97         |
| <b>5 – Caracterização e interrogação dos sensores ópticos.....</b>                             | <b>99</b>  |
| 5.1 – Introdução.....  | 99         |
| 5.2 – Sensibilidade à temperatura das redes.....   | 100        |
| 5.3 – Sensibilidade à deformação longitudinal.....   | 102        |
| 5.4 – A evolução da unidade de interrogação dos sensores de rede de Bragg em fibra óptica..... | 104        |
| 5.4.1 – As diferentes etapas de evolução.....  | 105        |
| 5.5 – Sistema de interrogação dos sensores interferométricos.....                              | 111        |
| <b>6 – Embebimento de sensores ópticos em compósitos laminados.....</b>                        | <b>115</b> |
| 6.1 – Introdução.....  | 115        |
| 6.1.1 – A escolha do material.....   | 116        |
| 6.2 – Procedimento experimental.....   | 117        |
| 6.3 – Evolução dos embebimentos.....   | 120        |
| 6.4 – A variação de $\lambda_B$ durante a produção da placa laminada.....                      | 128        |



|  |            |
|--|------------|
| 6.5 – O efeito do revestimento no sensor.....  | 129        |
| 6.6 – Exemplo de embebimentos obtidos nos materiais compósitos.....                            | 132        |
| 6.7 – Embebimento de uma fibra com uma cavidade interferométrica de Fabry-Pérot.....           | 138        |
| <b>7 – Conceção e caracterização das placas sensoras.....</b>                                  | <b>141</b> |
| 7.1 – Introdução.....  | 141        |
| 7.2 – Ensaio de deformação longitudinal.....   | 142        |
| 7.2.1 – Introdução.....  | 142        |
| 7.2.2 – Placa sensora em fibra de carbono/epóxico.....   | 144        |
| 7.2.3 – Placa sensora em fibra de vidro/epóxico.....   | 149        |
| 7.2.4 – Placa sensora em resina de epóxico.....  | 154        |
| 7.2.5 – Discussão dos resultados das placas sensoras ensaiadas.....                            | 160        |
| 7.3 – Conceção de uma placa sensora em fibra de carbono com embebimento de fibras ópticas..... | 162        |
| 7.3.1 – Introdução.....  | 162        |
| 7.3.2 – Modelo numérico da placa sensora com a fibra óptica sem revestimento.....              | 164        |
| 7.3.3 – Modelo numérico da placa sensora com a fibra óptica com revestimento.....              | 166        |
| 7.3.4 – Discussão/Conclusão.....   | 169        |
| 7.4 – Comportamento da placa sensora em fibra de carbono/epóxico.....                          | 170        |
| 7.4.1 – Comportamento em curvatura.....  | 170        |
| 7.4.2 – Comportamento a um carregamento transversal.....                                       | 173        |
| 7.4.3 – Comportamento a altas temperaturas.....  | 174        |
| 7.4.4 – Ensaio com rotação da placa sensora.....   | 177        |
| 7.4.4.1 – Introdução.....  | 177        |
| 7.4.4.2 – Variação angular da placa sensora.....   | 178        |
| 7.4.4.3 – Variação angular da placa sensora com taxa de aquisição elevada.....                 | 180        |
| 7.4.4.4 – Discussão do comportamento angular da placa sensora.....                             | 182        |
| 7.5 – Aplicação de uma placa sensora como sensor de deformação longitudinal.....               | 182        |
| 7.5.1 – Introdução.....  | 182        |
| 7.5.2 – Ensaio realizado às placas.....  | 184        |
| 7.5.3 – Análise por elementos finitos.....   | 187        |
| 7.5.4 – Discussão dos resultados.....  | 194        |
| 7.6 – Caracterização da placa sensora em ensaios dinâmicos.....                                | 195        |
| 7.6.1 – Introdução.....  | 195        |
| 7.6.2 – Placa sensora laminada em fibra de carbono/epóxico.....                                | 197        |
| 7.6.3 – Provedor em estrutura sanduíche obtida por RTM.....                                    | 201        |
| 7.6.4 – Discussão.....   | 206        |
| 7.7 – Conclusão.....   | 206        |
| <b>8 – Conceção de outras placas com sensores ópticos embebidos.....</b>                       | <b>209</b> |
| 8.1 – Introdução.....  | 209        |
| 8.2 – Sensor simultâneo de pressão e temperatura numa placa compósita híbrida.....             | 210        |
| 8.2.1 – Conceção da placa sensora.....   | 211        |
| 8.2.2 – Caracterização da placa sensora.....   | 212        |
| 8.2.3 – Semelhanças com o sensor de microcurvatura.....  | 215        |
| 8.2.4 – Resultados obtidos com a placa sensora híbrida.....                                    | 216        |
| 8.2.5 – Conclusões.....  | 220        |
| 8.3 – Rosetas em fibra óptica.....   | 221        |
| 8.3.1 – Os princípios das rosetas.....   | 221        |
| 8.3.2 – Conceção e resultados das rosetas com configuração rectangular.....                    | 226        |
| 8.3.2.1 – Discussão.....   | 234        |

|  |            |
|--|------------|
| 8.3.3 – Conceção de uma roseta com configuração “delta”<br>(rectangular transformada)..... | 235        |
| 8.3.3.1 – Comportamento à tracção.....   | 237        |
| 8.3.3.2 – Discussão.....   | 242        |
| 8.3.3.3 – Comportamento à flexão.....  | 242        |
| 8.3.3.4 – Comportamento à vibração.....  | 243        |
| 8.3.3.5 – Conclusão.....   | 246        |
| 8.4 – Resultados do embebimento de um interferómetro de Fabry-Perot.....                   | 247        |
| 8.4.1 – Introdução.....  | 247        |
| 8.4.2 – Conceção da placa.....   | 248        |
| 8.4.3 – Comportamento dos sensores embebidos.....  | 249        |
| 8.4.4 – Conclusão.....   | 251        |
| <b>9 – Placa multisensora.....</b>   | <b>253</b> |
| 9.1 – Introdução.....  | 253        |
| 9.2 – Embebimento do elemento piezoeléctrico.....  | 254        |
| 9.2.1 – Interferometria de <i>Speckle</i> .....  | 256        |
| 9.2.2 – Resultados do ESPI.....  | 258        |
| 9.3 – Embebimento do PZT e dos sensores ópticos.....                                       | 261        |
| 9.4 – Comportamento de placa multisensora.....   | 263        |
| 9.4.1 – A frequências superiores.....  | 269        |
| 9.5 – Conclusão.....   | 275        |
| <b>10 – Conclusão.....</b>   | <b>277</b> |
| 10.1 – Conclusões.....   | 277        |
| 10.2 – Trabalho futuro.....  | 281        |
| <b>Anexo A – Artigos realizados no âmbito deste trabalho.....</b>                          | <b>283</b> |
| <b>Anexo B – Ficha técnica da fonte óptica.....</b>  | <b>285</b> |
| <b>Anexo C – Propriedades físicas da sílica.....</b>                                       | <b>286</b> |
| <b>Anexo D – Ficha técnica da fibra óptica.....</b>  | <b>287</b> |
| <b>Anexo E – Ficha técnica dos extensómetros eléctricos.....</b>                           | <b>288</b> |
| <b>Anexo F – Ficha técnica da roseta eléctrica.....</b>                                    | <b>289</b> |
| <b>Anexo G – Ficha de calibração do transdutor de carga.....</b>                           | <b>290</b> |
| <b>Referências.....</b>  | <b>291</b> |

## Listagem das figuras

---

|  |     |
|--|-----|
| Figura 2.1 – Algumas das aplicações em que se usam sensores ópticos.....   | 12  |
| Figura 2.2 – Esquema simplificado da monitorização de uma ponte.....   | 16  |
| Figura 2.3 – Esquema do processo de polarização.....   | 26  |
| Figura 2.4 – Representação esquemática de um piezoeléctrico (PZT).....   | 26  |
| Figura 3.1 – Classificação dos materiais compósitos.....   | 39  |
| Figura 3.2 – Entrelaçamento de um tecido compósito.....  | 42  |
| Figura 3.3 – Alguns dos estilos de entrelaçados dos tecidos.....   | 42  |
| Figura 3.4 – Esquema de um entrelaçado tridimensional.....   | 43  |
| Figura 3.5 – Constituição de um laminado.....  | 46  |
| Figura 3.6 – Sequência e empilhamento de um laminado.....  | 47  |
| Figura 3.7 – Sanduíche com núcleo de um material sólido.<br>(a) Espuma. (b) Madeira Leve.....  | 48  |
| Figura 3.8 – Sanduíche com núcleos de materiais perfurados.<br>(a) Ninho de Abelha. (b) Cartão Canelado.....                             | 49  |
| Figura 3.9 – Esquema de montagem na produção por autoclave em saco de vácuo.<br>Componentes usados num saco de vácuo.....                | 53  |
| Figura 3.10 – Resistência dos materiais compósitos em função da percentagem<br>de reforço em peso.....                                   | 57  |
| Figura 3.11 – Relação entre os constituintes e o produto final, em termos de<br>tensão em função da deformação.....                      | 58  |
| Figura 3.12 – Resposta dos materiais elástico e viscoelástico.....   | 58  |
| Figura 3.13 – Ensaio de fluência, com o comportamento da extensão em função<br>do tempo para os materiais compósitos em fluência.....    | 59  |
| Figura 3.14 – Ensaio de relaxação de tensões, com a tensão aplicada em função<br>do tempo para os materiais compósitos em relaxação..... | 59  |
| Figura 3.15 – (a) Estação orbital. (b) Vaivém espacial no momento de descolagem.....   | 61  |
| Figura 3.16 – Componente de uma auto-estrada, em Inglaterra.....   | 62  |
| Figura 3.17 – (a) Aerogerador [65]. (b) Estrutura marítima.....  | 63  |
| Figura 3.18 – O avião comercial A340 da Airbus.....  | 64  |
| Figura 3.19 – Embarcação militar.....  | 65  |
| Figura 3.20 – Próteses em material compósito.....  | 66  |
| Figura 4.1 – A qualidade dos componentes em oposição à redução<br>dos preços dos componentes chave.....                                  | 71  |
| Figura 4.2 – Espectro da luz, com a indicação dos comprimentos de onda<br>usados em sensores de fibra óptica.....                        | 72  |
| Figura 4.3 – Reflexão e refração da luz.....   | 73  |
| Figura 4.4 – Constituição da fibra óptica.....   | 73  |
| Figura 4.5 – Aplicação da lei de Snell.....  | 74  |
| Figura 4.6 – Ângulo crítico.....   | 75  |
| Figura 4.7 – Refracção, reflexão total e ângulo crítico.....   | 75  |
| Figura 4.8 – Feixe incidência na fibra e sua reflexão.....   | 76  |
| Figura 4.9 – Ângulo de entrada da luz na fibra óptica. Abertura numérica (N.A.).....   | 77  |
| Figura 4.10 – Perfil do índice de refração da fibra óptica multimodo e monomodo.....   | 78  |
| Figura 4.11 – Princípios de operação das redes de Bragg.....   | 89  |
| Figura 4.12 – Montagem experimental usada na fabricação de redes de Bragg<br>através da técnica da máscara de fase.....                  | 93  |
| Figura 4.13 – Algumas das topologias de multiplexagem para reflexão.....   | 95  |
| Figura 4.14 – A fibra óptica fica oval, por acção das fibras de reforço.....   | 96  |
| Figura 4.15 – Interferómetro óptico de Fabry-Pérot.....  | 98  |
| Figura 5.1 – Caracterização espectral de uma das redes de Bragg usadas,<br>em reflexão (a) e em transmissão (b).....                     | 100 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.2 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura, para uma rede de Bragg sem revestimento.....   | 101 |
| Figura 5.3 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação longitudinal.....  | 103 |
| Figura 5.4 – Representação esquemática da integração de elementos micro-ópticos na constituição de filtros com resposta espectral linear.....                                | 105 |
| Figura 5.5 – Resposta espectral deste tipo de filtros usado para a interrogação de sensores de redes de Bragg.....   | 106 |
| Figura 5.6 – (a) Esquema do primeiro set-up de monitorização de uma rede de Bragg. (b) Montagem experimental.....  | 107 |
| Figura 5.7 – Esquema do segundo set-up.....  | 108 |
| Figura 5.8 – (a) Unidade de interrogação, para um só sensor, e uma taxa de aquisição de 100 Hz. (b) Painel de controlo do software de aquisição e gestão de dados.....       | 109 |
| Figura 5.9 – Esquema do terceiro set-up.....   | 109 |
| Figura 5.10 – (a) Unidade de interrogação, para quatro sensores, e uma taxa de aquisição de 160 Hz. (b) Painel de controlo do software de aquisição e gestão de dados.....   | 110 |
| Figura 5.11 – Esquema do quarto set-up.....  | 110 |
| Figura 5.12 – (a) Unidade de interrogação, com uma taxa de aquisição até 30 KHz. (b) Painel de controlo do software de aquisição e gestão de dados.....                      | 111 |
| Figura 5.13 – Curva da função de transferência de um sensor em cavidade Interferométrica.....  | 112 |
| Figura 5.14 – (a) Montagem experimental para a interrogação do EFPI e (b)Espectro da luz reflectida pelo EFPI e os dois FBG's.....   | 113 |
| Figura 6.1 – (a) Tecido de fibra de carbono usada, com a configuração de “twill” 2/2. (b) Esquema do empilhamento nas amostras, com a fibra óptica entre camadas.....        | 118 |
| Figura 6.2 – Diagrama de temperatura e de pressão, usado na fabricação dos provetes....  | 119 |
| Figura 6.3 – (a) Fabrico de provetes por autoclave. (b) Fabrico de provetes por prensa de pratos quentes.....  | 119 |
| Figura 6.4 – Aspecto geral das amostras produzidas, fora da zona da fibra óptica.....  | 121 |
| Figura 6.5 – Amostra obtida por prensa de pratos quentes.....  | 122 |
| Figura 6.6 – Amostra obtida por autoclave.....   | 122 |
| Figura 6.7 – (a) Amostra com o revestimento destruído. (b) Espectro óptico obtido pelo sensor embebido.....  | 123 |
| Figura 6.8 – Deformação em forma de olho da protecção exterior da fibra óptica.....  | 124 |
| Figura 6.9 – (a), (b) Embebimento da fibra óptica numa placa laminada. (b) Espectro óptico obtido pelo sensor embebido.....  | 126 |
| Figura 6.10 – (a) e (b) Fibras ópticas embebidas em placas laminadas. (c) Espectro óptico obtido pelo sensor embebido na mostra (a).....                                     | 127 |
| Figura 6.11 – Variação do $\lambda_B$ , durante a produção da placa laminada.....  | 129 |
| Figura 6.12 – Espectros em reflexão das redes de Bragg.....  | 131 |
| Figura 6.13 – (a) Placa sensora laminada em fibra de carbono/epóxido. (b) Resposta da rede de Bragg na placa sensora.....  | 133 |
| Figura 6.14 – (a) Placa sensora laminada em fibra de vidro/epóxido. (b) Resposta da rede de Bragg na placa sensora.....  | 133 |
| Figura 6.15 – (a) Placa sensora em resina de epóxido. (b) Resposta da rede de Bragg na placa de resina de epóxido.....   | 134 |
| Figura 6.16 – (a) Placa sensora laminada em fibra de carbono/epóxido de reduzidas dimensões. (b) Resposta da rede de Bragg na placa de carbono.....                          | 134 |
| Figura 6.17 – (a) Corte do sensor a 45°. (b) Corte do sensor a 0°. (c) Placa sensora com uma Roseta óptica embebida. (d) Resposta das redes de Bragg embebidas na placa..... | 135 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.18 – (a) Roseta óptica sensora em fibra de carbono/epóxido.<br>(b) Resposta das redes de Bragg embebidas na placa.....   | 136 |
| Figura 6.19 – (a) Embebimento de fibras ópticas por RTM.<br>(b) Provete cortado da placa obtida por RTM, com sensor embebido.<br>(c) Espectro em reflexão de uma das redes de Bragg embebidas na placa..... | 137 |
| Figura 6.20 – (a) Colocação de um interferómetro entre placas de compósito.<br>(b) Secção transversal do embebimento na zona do tubo capilar.....   | 138 |
| Figura 6.21 – (a) Resposta da cavidade após o embebimento.<br>(b) Resposta da rede de Bragg.....  | 139 |
| Figura 7.1 – Posicionamento do extensómetro em relação à rede de Bragg, na placa sensora em resina de epóxido.....  | 143 |
| Figura 7.2 – Esquema do sistema de monitorização. FBG – Sensor de rede de Bragg em fibra óptica. SG – Sensor eléctrico, extensómetro.....   | 143 |
| Figura 7.3 – Montagem da placa sensora na máquina de ensaios.....   | 145 |
| Figura 7.4 – (a) Força aplicada. (b) A deformação obtida para a força aplicada.....   | 145 |
| Figura 7.5 – Variação do $\lambda_B$ com a força aplicada na placa sensora de carbono.....  | 146 |
| Figura 7.6 – Comportamento da rede de Bragg aos sucessivos carregamentos.....   | 146 |
| Figura 7.7 – Relação linear entre os sensores óptico e eléctrico.....   | 147 |
| Figura 7.8 – Comportamento dos dois sensores na placa sensora .....   | 148 |
| Figura 7.9 – Comportamento da ressonância de Bragg, com a carga aplicada.....   | 148 |
| Figura 7.10 – Montagem da placa sensora na máquina de ensaios.....  | 149 |
| Figura 7.11 – (a) Força aplicada à placa. (b) Deformação imposta à placa sensora.....   | 150 |
| Figura 7.12 – Sensibilidade da placa sensora em fibra de vidro/epóxido.....   | 151 |
| Figura 7.13 – Comportamento da rede de Bragg nos sucessivos carregamentos efectuados à placa sensora de fibra de vidro.....   | 152 |
| Figura 7.14 – Relação entre os sensores óptico e eléctrico.....   | 152 |
| Figura 7.15 – Comportamento dos dois sensores na placa sensora.....   | 153 |
| Figura 7.16 – comportamento da ressonância de Bragg, com a carga aplicada.....  | 154 |
| Figura 7.17 – Montagem da placa sensora em resina na máquina de ensaios.....  | 155 |
| Figura 7.18 – (a) Força aplicada à placa. (b) Deformação imposta à placa sensora.....   | 156 |
| Figura 7.19 – Sensibilidade da placa sensora em resina de epóxido.....  | 156 |
| Figura 7.20 – Comportamento da rede de Bragg nos sucessivos carregamentos efectuados à placa sensora em resina de epóxido.....  | 157 |
| Figura 7.21 – Relação entre as deformações dos sensores óptico e eléctrico.....   | 158 |
| Figura 7.22 – Comportamento dos dois sensores na placa sensora em resina de epóxido.....  | 158 |
| Figura 7.23 – Comportamento da ressonância de Bragg, com a carga aplicada.....  | 159 |
| Figura 7.24 – Geometria e condições fronteira consideradas.....   | 164 |
| Figura 7.25 – Malhagem 3D da placa sensora com fibra óptica sem revestimento.....   | 164 |
| Figura 7.26 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material compósito segundo a largura do provete, eixo 1.....  | 165 |
| Figura 7.27 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material compósito segundo a espessura do provete, eixo 3.....  | 166 |
| Figura 7.28 – Geometria e condições fronteira do modelo.....  | 167 |
| Figura 7.29 – Malhagem 3D da placa sensora com fibra óptica revestida.....  | 167 |
| Figura 7.30 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material compósito segundo a largura do provete, eixo 1.....  | 168 |
| Figura 7.31 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material compósito segundo a espessura do provete, eixo 3.....  | 169 |
| Figura 7.32 – Resposta espectral da rede de Bragg na placa sensora quando sujeita às diferentes curvaturas.....   | 170 |
| Figura 7.33 – (a) Resposta da variação da rede à curvatura imposta na placa.<br>(b) Tendência linear da rede de Bragg com o inverso da curvatura.....   | 172 |
| Figura 7.34 – Posicionamento das cargas aplicadas à placa sensora.....  | 173 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 7.35 – Resposta espectral da rede de Bragg às solicitações da carga transversal aplicada.....   | 174 |
| Figura 7.36 – Variação com a temperatura de uma rede de Bragg embebida numa placa sensora em fibra de carbono/epóxico.....                         | 175 |
| Figura 7.37 – Comportamento da placa sensora em fibra de carbono/epóxico, a uma carga aplicada de 1000 N, com a temperatura.....                   | 176 |
| Figura 7.38 – Esquema da rotação aplicada, com $\alpha$ a variar entre os 0° e 20°.....  | 178 |
| Figura 7.39 – Variação de $\lambda_B$ , em função do ângulo aplicado, para a placa sensora.....  | 179 |
| Figura 7.40 – Comportamento da placa quando sofre uma rotação rápida dos 0° aos 20°..  | 180 |
| Figura 7.41 – Comportamento da placa quando sofre uma rotação de 5° em 5°. Sentido horário (1), sentido anti-horário (2).....                      | 181 |
| Figura 7.42 – (a) Set-up na máquina de ensaios. (b) Posicionamento dos sensores na frente e verso da placa de ensaios.....                         | 184 |
| Figura 7.43 – Comportamento dos dois sensores durante a fixação e de um ensaio realizado à placa de teste.....                                     | 185 |
| Figura 7.44 – Deformações obtidas pelos diferentes sensores em função da força.....  | 186 |
| Figura 7.45 – (a) Relacionamento entre os sensores em função da deformação. (b) Correlação entre as deformações obtidas pelos dois sensores.....   | 186 |
| Figura 7.46 – Geometria e condições de fronteiras consideradas.....  | 188 |
| Figura 7.47 – Malhagem do conjunto placa sensora e placa de compósito vidro/epóxico.   | 188 |
| Figura 7.48 – Representação do campo de tensões obtidos por simulação, no lado da placa sensora colada.....  | 189 |
| Figura 7.49 – Representação do campo de deformação calculado por análise de elementos finitos, no lado contrário a aplicação da placa sensora..... | 190 |
| Figura 7.50 – Curvaturas da placa de teste, pela presença das placas sensoras.....   | 191 |
| Figura 7.51 – Valores obtidos pelos sensores eléctricos.....   | 192 |
| Figura 7.52 – Valores calculados por elementos finitos.....  | 193 |
| Figura 7.53 – Correlação entre os valores calculados e obtidos pelo sensor óptico, na posição H.....   | 194 |
| Figura 7.54 – Esquema da carga aplicada na flexão de quatro pontos.....  | 195 |
| Figura 7.55 – Máquina de ensaios utilizada na flexão em quatro pontos.....   | 196 |
| Figura 7.56 – Curva de calibração de um transdutor de carga.....   | 197 |
| Figura 7.57 – Placa laminada em fibra de carbono/epóxico, usada nos ensaios de flexão.   | 197 |
| Figura 7.58 – (a) Forma da força alternada aplicada. (b) Deformação imposta à placa.....   | 198 |
| Figura 7.59 – Deformação medida pelo sensor óptico embebido.....   | 199 |
| Figura 7.60 – Deformações medidas pelos sensores, mostrando a consistência nos valores alcançados ao longo do ensaio.....                          | 200 |
| Figura 7.61 – Comparação entre a rede de Bragg e o extensómetro.....   | 200 |
| Figura 7.62 – Exemplo de um provete sanduíche montado na máquina de ensaios.....   | 202 |
| Figura 7.63 – (a) Força alternada aplicada (b) Deformação imposta à estrutura sanduíche.....   | 203 |
| Figura 7.64 – Comportamento do sensor óptico em função da força aplicada.....  | 203 |
| Figura 7.65 – Excerto representativo de uma parte ínfima do comportamento dos sensores na estrutura, para um intervalo de tempo de 3 segundos..... | 204 |
| Figura 7.66 – Resposta do sensor óptico (FBG), e do extensómetro eléctrico(SG).....  | 205 |
| Figura 8.1 – Montagem experimental para a monitorização da placa.....  | 211 |
| Figura 8.2 – (a) Estufa com temperatura controlada. (b) Máquina de pressão usada na realização dos testes.....                                     | 213 |
| Figura 8.3 – (a) Corte longitudinal da placa. (b) Corte transversal ampliado, mostrando a região de interface do compósito híbrido.....            | 214 |
| Figura 8.4 – Esquema geral de um sensor de microcurvatura.....   | 215 |
| Figura 8.5 – Resposta da placa sensora à temperatura.....  | 217 |
| Figura 8.6 – Resposta da placa sensora à pressão.....  | 218 |
| Figura 8.7 – Desempenho do sensor de acordo com a expressão 8.2, para as pressões e temperaturas aplicadas.....                                    | 219 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 8.8 – Configurações de rosetas, geometricamente diferentes mas funcionalmente equivalentes, com arranjos rectangular e delta.....   | 222 |
| Figura 8.9 – Definição dos eixos principais.....   | 223 |
| Figura 8.10 – Esquema do Círculo de Mohr com a representação da deformação local ( $\varepsilon_a$ ) em função das deformações principais ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ ).....  | 223 |
| Figura 8.11 – Esquema do Círculo de Mohr com a representação da deformação local correspondente a cada um dos três sensores da roseta rectangular....  | 224 |
| Figura 8.12 – (a) Set-up de ensaio em tensão. (b) Configuração da roseta.....  | 227 |
| Figura 8.13 – Espectros em reflexão das redes de Bragg embebidas.....  | 228 |
| Figura 8.14 – Comportamento da roseta às solicitações impostas, quando comparada com a roseta eléctrica.....   | 229 |
| Figura 8.15 – (a) Roseta com sensores individuais.<br>(b) Posicionamento dos sensores ópticos.....   | 230 |
| Figura 8.16 – Flexão em quatro pontos realizada à roseta rectangular.....  | 231 |
| Figura 8.17 – Comportamento da rede de Bragg em A.....   | 231 |
| Figura 8.18 – (a) Variação do comprimento de onda na rede Bragg da fibra B.<br>(b) Variação do comprimento de onda da rede de Bragg da fibra óptica C. Em função da flexão aplicada.....   | 232 |
| Figura 8.19 – Variação do comprimento de onda dos sensores com a flexão.....   | 234 |
| Figura 8.20 – (a) Roseta óptica embebida. (b) Posicionamento dos sensores.....   | 236 |
| Figura 8.21 – Esquema da montagem da roseta na placa de teste.....   | 237 |
| Figura 8.22 – Variação do comprimento de onda com o decorrer do ensaio.....  | 237 |
| Figura 8.23 – Deformação medida pelas rosetas em função da força aplicada.....   | 238 |
| Figura 8.24 – Correlação entre as deformações das rosetas na direcção a $0^\circ$ , na direcção a $45^\circ$ e a $90^\circ$ .....  | 239 |
| Figura 8.25 – Variação do $\lambda_B$ com a força aplicada, a $0^\circ$ .....  | 240 |
| Figura 8.26 – Variação do $\lambda_B$ com a força aplicada, a $45^\circ$ .....   | 240 |
| Figura 8.27 – Variação do $\lambda_B$ com a força aplicada, a $90^\circ$ .....   | 241 |
| Figura 8.28 – Deformação registada em função da flexão imposta.....  | 243 |
| Figura 8.29 – (a) Vibração registada pela roseta, quando a placa de teste está encastrada numa das extremidades. (b) Observação isolada dos sensores..   | 244 |
| Figura 8.30 – (a) Vibração registada pela roseta, quando a placa de teste se encontra apoiada na segunda extremidade. (b) Observação isolada dos sensores.....   | 245 |
| Figura 8.31 – (a) Colocação dos sensores entre as camadas do material compósito.<br>(b) Posicionamento dos sensores e dimensões da placa realizada.....  | 248 |
| Figura 8.32 – Resposta do sensor FBG, à força aplicada.....  | 249 |
| Figura 8.33 – Comparação entre os dois sensores, eléctrico e óptico embebidos.....   | 250 |
| Figura 8.34 – Respostas obtidas pelos sensores, EFPI e SG.....   | 251 |
| Figura 9.1 – (a) Aspecto do piezoelectrico.<br>(b) Colocação de contactos eléctricos nas faces do piezoelectrico.<br>(c) Piezoelectrico embebido numa das faces do compósito.<br>(d) Placa de material compósito com um piezoelectrico embebido..... | 255 |
| Figura 9.2 – Montagem inicial para verificação da resposta do piezoelectrico.....  | 256 |
| Figura 9.3 – Deslocações da placa com embebimento parcial do piezoelectrico, em função da tensão eléctrica aplicada.....   | 258 |
| Figura 9.4 – Deslocação da placa em função da tensão eléctrica aplicada no caso do embebimento parcial.....  | 259 |
| Figura 9.5 – Deslocações da placa com embebimento total do piezoelectrico, em função da tensão eléctrica aplicada.....   | 259 |
| Figura 9.6 – Comportamento linear do conjunto, em função da tensão aplicada. Embebimento total.....  | 260 |
| Figura 9.7 – Empilhamento da placa multisensora, com o posicionamento dos sensores..   | 261 |
| Figura 9.8 – Corte da placa multisensora na zona do piezoelectrico.....  | 262 |
| Figura 9.9 – Embebimento dos sensores ópticos (a) FBG e (b) EFPI.....  | 263 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 9.10 – Forma da força aplicada à placa multisensora, e a deformação atingida na superfície junto dos sensores ópticos.....                          | 264 |
| Figura 9.11 – (a) Relação entre a força aplicada e a deformação obtida pelo FBG.<br>(b) Comparação entre as deformações obtidas pelos sensores SG e FBG... | 265 |
| Figura 9.12 – (a) Relação entre a força aplicada e a resposta do sensor EFPI.<br>(b) Comparação com a resposta do SG.....                                  | 266 |
| Figura 9.13 – (a) Comparação entre os valores do PZT e a força aplicada.<br>(b) Comparação entre os valores do PZT e o SG.....                             | 268 |
| Figura 9.14 – Comparação entre os comportamentos registados pelo PZT com o EFPI, e com o FBG.....  | 269 |
| Figura 9.15 – Comparação entre os sensores FBG, PZT e EFPI à frequência de 40 Hz...  | 270 |
| Figura 9.16 – Comparação entre os sensores FBG, PZT e EFPI à frequência de 70 Hz...  | 271 |
| Figura 9.17 – Comparação entre os sensores FBG, PZT e EFPI à frequência de 100 Hz..  | 272 |
| Figura 9.18 – Comportamento do PZT para as frequências de 150 Hz, 200 Hz e 250 Hz.   | 273 |
| Figura 9.19 – Espectro em reflexão da rede de Bragg, após os ensaios em frequência.....  | 274 |

## Listagem das tabelas

---

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais usados como matriz.....                   | 56  |
| Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais usados como reforço.....                  | 57  |
| Tabela 4.1 – Propriedades típicas de dois tipos de fibra.....                     | 79  |
| Tabela 6.1 – Valores da transmissão óptica nas fibras após cura.....              | 123 |
| Tabela 6.2 – Condição da rede de Bragg quando embebida no compósito laminado..... | 130 |
| Tabela 7.1 – Propriedades mecânicas das camadas consideradas .....                | 163 |
| Tabela 7.2 – Valores da deformação medidos e calculados.....                      | 191 |
| Tabela 8.1 – Algumas das propriedades dos pré-impregnados utilizados.....         | 211 |
| Tabela 8.2 – Perdas verificadas na inserção, após o processo de cura.....         | 214 |

## Abreviaturas usadas com os sensores

---

**FBG** - Fiber Bragg Grating (Rede de Bragg em Fibra Óptica).

**SG** - Strain Gauge (Extensómetro Eléctrico).

**EFPI** - Extrinsic Fabry-Perot Interferometer (Interferómetro Extrínseco de Fabry-Perot).

**PZT** - Piezoelectric, Lead Zirconate Titanate (Elemento Piezoeléctrico).



# Capítulo 1

## 1 – Introdução

### 1.1 – Enquadramento e motivação

A competição no mercado industrial tem forçado os construtores/fabricantes de estruturas em materiais compósitos, a procurarem novos métodos de reduzir custos e aumentarem as margens de lucro. Aqueles que forem capazes de liderar o mercado podem obter grandes benefícios financeiros, podendo passar pela inserção de metodologias de monitorização, ou ainda pela implementação de sistemas adequados para monitorizar e prever erros, mas também, a possibilidade de aumentar a eficiência dos processos de fabrico. Tem-se verificado um grande empenho no desenvolvimento de metodologias com vista as inspecções não destrutivas, levando a verificações logo na fase de produção, assim como, da integridade das estruturas antes da sua aplicação. A maioria desses métodos tem uma grande dificuldade de implementação, principalmente em zonas de difícil acesso de estruturas complexas, como é o caso da área da aeronáutica. Por essa razão em particular, revela-se necessária uma avaliação interna da estrutura, recorrendo a monitorização contínua da integridade estrutural dos componentes críticos, desde o fabrico até ao fim de vida de uma estrutura. Em função dos custos envolvidos, e sobretudo num mercado cada vez mais competitivo, a

monitorização das deformações e tensões a que uma estrutura se encontra submetida, parece ser a escolha racional para esses sistemas.

A monitorização em tempo real desde o processo de fabrico de uma estrutura, mas também durante o seu funcionamento em serviço, quando esta se encontra sujeita a solicitações mecânicas, quer sejam elas estáticas quer sejam dinâmicas, tornará possível otimizar os processos de fabrico, pela diminuição das tensões residuais, por exemplo, além de prevenir danos catastróficos, através da monitorização do seu estado em tempo real e de forma contínua.

O comportamento a longo prazo das estruturas compósitas pode ser previsto, através de modelos numéricos ou modelos experimentais. No entanto, para assegurar a sua integridade durante todo o seu tempo de vida, torna-se necessária uma monitorização meticulosa da sua deterioração, com recurso a avaliações não destrutivas.

Nos desenvolvimentos recentes, no domínio dos materiais e das estruturas compósitas, tem sido dado ênfase às potencialidades intrínsecas das estruturas inteligentes, para a resolução dos problemas associados ao desenvolvimento da futura geração de estruturas, caso das aeronaves, com a possibilidade de transformação em plena operação, por exemplo. As estruturas devem poder garantir a sua integridade, para além de serem capazes de reagir às necessidades, através de actuadores, contra potenciais situações críticas, como sejam, a atenuação de vibrações, por exemplo. A aplicação eficiente de tais sistemas requer a utilização de processadores que permitam a adaptação da estrutura às novas condições, através de aprendizagem autónoma, partindo da informação fornecida pelos sensores.

A origem das estruturas compósitas inteligentes data de há duas décadas atrás. O conceito de estrutura compósita inteligente surge da necessidade de dotar uma determinada estrutura com funções adicionais. Assim, inicialmente temos uma estrutura, que de uma forma passiva, suporta e transmite esforços. No entanto, se a essa estrutura adicionarmos sensores, passaremos a ter uma estrutura que além das funções descritas, também passa a ser uma estrutura sensível. Por seu turno, se adicionalmente

incluirmos na estrutura anterior actuadores, essa estrutura poderá também passar a ser uma estrutura activa.

De uma forma um pouco simplista, podemos dizer que o funcionamento de uma estrutura compósita inteligente se assemelha ao comportamento dos sistemas biológicos. No caso do ser humano, o sistema nervoso sente o estímulo, envia essa informação ao cérebro, que a processa, e este por sua vez, actua em consonância forçando os músculos a reagirem. Assim, podemos dizer que o Homem nasce com pouco conhecimento, mas com um grande potencial, em termos de inteligência. As estruturas, por seu turno, apesar de não possuírem a capacidade de se adaptarem às circunstâncias, podem, pela integração de sensores e actuadores controlados por um processador, e pela incorporação de algoritmos podem optimizar o seu desempenho em situações críticas e bem definidas. Dadas as evoluções que se vão registando com as novas gerações de componentes electrónicos e também opto-electrónicos, disponíveis para o processamento e transmissão de informação, a optimização torna-se cada vez mais eficiente, possibilitando um maior grau de mobilidade das estruturas, e com maior período de vida útil, o que à semelhança do ser humano, pode apresentar-se com um grande potencial de aprendizagem.

Um dos maiores interesses que tem despertado nos materiais compósitos, reside no facto de ser possível produzir um material ajustado às aplicações desejadas. Variando a arquitectura do empilhamento, a natureza das resinas e das fibras, e/ou o processo de fabricação, o material então obtido, ajustar-se-á melhor ao tipo de solicitações a que vai estar sujeito. A maior facilidade de manuseamento dos materiais compósitos permite o embebimento de sensores no material durante o processo de fabrico, como é o caso dos sensores em fibra óptica. Com recurso a um único sensor em fibra óptica, é possível a medição ao mesmo tempo de diferentes parâmetros físicos, tais como, a deformação a que o material está sujeito, a temperatura, assim como as vibrações no seio do material. Trata-se de um dispositivo com um potencial elevado para a concepção dos ditos “materiais inteligentes”.

A implementação tecnológica dos materiais compósitos inteligentes ainda se encontra na fase inicial. Infelizmente é histórico que, em investigação e

desenvolvimento, a obtenção de uma resposta “paga-se” com novas perguntas. O consumo energético, a fabricação, os constrangimentos ambientais, os testes funcionais, inspecções e manutenção são temas ainda em aberto à procura de resposta. Tal como em qualquer tecnologia emergente, o impacto comercial de sistemas inteligentes dependerá muito da relação entre custos e benefícios. Os requisitos em termos de custo mínimo, eficácia e durabilidade constituem um grande desafio.

O progresso tecnológico, nomeadamente na fabricação dos materiais compósitos, veio permitir a utilização de fibras ópticas, por embebedimento, e de materiais piezoelétricos, como sensores. Permitindo ainda a utilização de materiais electrorestritivos, ligas metálicas com memória de forma e líquidos electro-reológicos, isto só para citar alguns exemplos, como elementos de actuação, com os quais se pode fazer uso de microprocessadores, com algoritmos de optimização, como por exemplo as redes neuronais, e analisadores de sinal como controladores.

A aplicação de sensores de Bragg em fibra óptica, no domínio das estruturas compósitas laminadas, tem conhecido, nos últimos anos, um enorme desenvolvimento. De facto, sendo a monitorização da temperatura e da deformação as duas principais grandezas alvo de estudo na área da sensorização, estes sensores, em função da sua elevada sensibilidade e com a possibilidade de, uma vez associados a materiais compósitos, poderem constituir parte integrante e permanente da estrutura, revelam-se ser vantajosos. Além disso, uma das grandes vantagens destes sensores é a faculdade de, a partir de uma única fibra óptica, poderem ser escritos vários sensores. A sua utilização como elemento sensor associa todas as propriedades comuns aos sensores em fibra óptica.

Um nível mais sofisticado para uma estrutura compósita poderá ser conseguido através da possibilidade de a tornar adaptativa. Este tipo de estruturas poderá ter elementos que actuam como sensores e/ou actuadores ligados através de um controlador. Esta arquitectura poderá proporcionar às estruturas a capacidade de se adaptarem a várias situações predefinidas, ou às novas situações que possam enfrentar, mas sempre dentro de um determinado limite, em função da programação imposta ao controlador/processador, que poderá permitir à estrutura uma determinada liberdade na

adaptação às situações. Ou seja, os processadores que controlam a estrutura, podem permitir que esta se adapte, por aprendizagem autónoma, às novas situações. Desta forma, as estruturas compósitas inteligentes são sistemas que agregam materiais com a capacidade de sentir estímulos externos, e de lhes responder de uma forma activa, e em tempo real. O controlo da mesma deixa de ser feito directamente, pela intervenção do Homem, para passar a ser realizado pelos diferentes algoritmos de optimização e de funcionamento. Nestas novas situações, o comportamento da estrutura será ditado pelos sensores e actuadores que ela contém. Esta será de facto, com certeza, a estrutura compósita inteligente de um futuro próximo.

## 1.2 – Objectivos

Este trabalho tem por objectivo fundamental estudar, desenvolver e implementar soluções com a utilização da fibra óptica quando embebida em material compósito, principalmente os sensores em rede de Bragg em fibra óptica. Assim como, melhorar o conhecimento da interacção entre a fibra óptica e o compósito em que está embebida, e otimizar os embebimentos para diferentes métodos de produção utilizados.

O embebimento da fibra óptica tem como objectivo obter placas sensoras laminadas com a menor espessura possível, na ordem dos 350  $\mu\text{m}$  a 400  $\mu\text{m}$ , por ser uma configuração pouco considerada devido à sua complexidade. Situação que poderá demonstrar-se um pouco mais complexa do que o inicialmente previsto, dadas as muitas situações de perda de comunicação na fibra óptica, quando esta se encontra embebida nas estruturas compósitas, muito possivelmente por rotura destas durante o processo de fabricação dos laminados. Preocupação estendida na obtenção de placas sensoras capazes de sentir as deformações sofridas por esta, quando coladas à superfície de uma estrutura, mas sem a influenciar, minimizando tanto quanto possível agirem como um reforço localizado.

O estudo do comportamento de placas laminadas, quando estas estruturas têm embebidas fibras ópticas nomeadamente sensores de Bragg, passará por uma fase de construção e elaboração de placas compósitas, principalmente com a utilização de materiais com elevado módulo de elasticidade e resistência, como o são as fibras de carbono, envolvidas por uma matriz de resina de epóxico. Tal passará por estudar, a questão do estrangulamento e/ou interrupção da passagem de luz nas fibras ópticas, quando embebidas, mas também pelo revestimento colocado posteriormente à gravação da rede de Bragg na fibra, de um material muito semelhante ao da bainha da fibra óptica, verificando se afecta a sensibilidade do conjunto, quando as placas são sujeitas a solicitações.

Outro objectivo é analisar também, com recurso à simulação por elementos finitos, os campos de tensões e de deformações nos laminados, quando impostas as solicitações, dedicando uma especial atenção ao que acontece na zona envolvente aos sensores de Bragg. Há a consciência de que só esta abordagem seria motivo para um trabalho de grande envolvimento. No entanto, não sendo esse o objectivo do presente trabalho, esta análise será feita de uma forma um pouco mais leve, não efectuando grandes refinamentos na simulação.

Numa fase posterior, otimizar os processos de embebimento no sentido de desenvolver uma placa sensora em compósito, que possa servir como sensor de deformação. Quando aplicada em diferentes estruturas, recorrer à comparação entre a placa sensora com o sensor óptico embebido, e um extensómetro colado à superfície da estrutura, com vista às potenciais aplicações em que se possa substituir os tradicionais sensores eléctricos. Nesta análise será também considerada a possibilidade da sua implementação em peles para estruturas sanduíche, dado que estas poderão ser obtidas pelos diferentes processos de fabrico, como sejam, a fabricação por autoclave, prensa de pratos quentes, estratificação manual mas também na situação em que são obtidas por moldação por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM).

Numa fase posterior, para além dos sensores de rede de Bragg, será também considerada a optimização do embebimento de outro tipo de sensores em fibra óptica, como as cavidades interferométricas de Fabry-Pérot. Para além destes sensores em fibra

óptica, pretendeu-se iniciar, também, o estudo do processo de embebimento de piezoeléctricos, em compósitos à base de fibra de carbono, situação que obrigará inevitavelmente a um aumento da espessura do laminado. A intenção é que estes possam funcionar não só como sensores, mas muito possivelmente como actuadores.

## 1.3 – Organização da tese

Este trabalho encontra-se organizado em dez capítulos. Neste primeiro capítulo, apresentam-se os principais objectivos deste trabalho. O segundo capítulo, dedica-se aos diferentes componentes associados aos materiais compósitos, e que tornam estes cada vez mais interessantes em termos das potencialidades de aplicação. Faz-se uma breve analogia com os seres biológicos. Apresentam-se os diferentes materiais, e os seus princípios básicos de operação. É dada uma maior atenção aos sensores ópticos, e a sua importância na monitorização das estruturas, principalmente na monitorização da integridade estrutural, desde a fase de produção até ao fim do seu tempo de vida útil. O terceiro capítulo apresenta as principais características dos materiais compósitos com que se trabalhou. Apresentam-se as diferentes metodologias de concepção dos compósitos laminados, com os quais houve necessidade, e/ou a possibilidade de trabalhar. No quarto capítulo, faz-se uma exposição mais exaustiva do elemento sensor base deste trabalho. Apresentam-se algumas das inúmeras aplicações em que ele surge. No capítulo cinco, apresenta-se fundamentalmente a evolução do sistema de interrogação e aquisição óptico, no qual houve uma ligeira participação na evolução conseguida. No capítulo seis, apresentam-se as diferentes etapas na evolução da metodologia de embebimento implementada, evidenciando algumas das amostras conseguidas. No capítulo sete, apresentam-se, fundamentalmente, os estudos realizados com as placas sensoras laminadas em fibra de carbono/epóxico. No capítulo oito, apresenta-se uma nova configuração para um sensor de pressão e temperatura, implementado num compósito híbrido, permitindo realizar medições simultâneas dos dois parâmetros, tendo como princípio base o conceito de microcurvatura provocada, quer pela diferença de expansão térmica, quer pelos efeitos de interacção entre as

diferentes fibras do reforço. Neste mesmo capítulo, apresenta-se a obtenção da configuração de uma roseta óptica embebida em material compósito. Apresenta-se, também, a concepção de uma placa sensora para medição de deformações longitudinais, e de vibrações. No capítulo nove, apresenta-se uma placa multisensora laminada com o embebimento de um sensor de Bragg, de um interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot de baixa *finesse*, assim como o embebimento de um piezoeléctrico. Apresentam-se algumas das experiências levadas a cabo, para mostrar as potencialidades de aplicação das placas sensoras, em comportamentos dinâmicos, a baixas frequências. Por fim no capítulo dez, apresentam-se as conclusões possíveis com este trabalho, assim como uma perspectiva de trabalho futuro a realizar.



# Capítulo 2

## 2 – Materiais compósitos inteligentes

### 2.1 – Introdução

Até há relativamente pouco tempo, os períodos de desenvolvimento tecnológico estavam ligados às mudanças no uso dos materiais, como seja a idade da pedra, do bronze e a do aço. No entanto, nos anos mais recentes a força motora nas mudanças tecnológicas foram alteradas em muitos aspectos em função da tecnologia da informação. Não é necessário olhar muito mais longe, para verificar o papel do microprocessador nas aplicações domésticas diárias que nos rodeiam, para ilustrar a “inteligência” existente nos nossos edifícios. É também importante, no entanto, notar que esta época da tecnologia de informação não deixou a engenharia de materiais intocável, e que a fusão entre a concepção de materiais e a potência de armazenamento e processamento de informação, levou a uma nova abordagem na área da engenharia dos materiais e estruturas.

A maioria dos materiais e estruturas da engenharia que nos são mais familiares são limitados, isto é, eles são processados e/ou projectados para oferecer uma série de respostas em número bastante limitado a um estímulo externo. Tais respostas são

usualmente optimizadas para uma dada série de condições genéricas mas, por outro lado não estão optimizadas para preencher a gama de cenários para os quais o material ou a estrutura possam estar expostos. As asas de um avião, por exemplo, têm de estar optimizadas para a função de levantar voo e de aterragem, logo preparadas para funções de voo rápido e lento, embora apresentem limitações quanto aos ventos cruzados que possam ocorrer quando essas situações surgem.

Nas aplicações tais como aeronaves, ultra-leves e satélites, é necessário que as estruturas possam operar muito próximo dos seus limites. Imagine-se que estas estruturas, e já não estamos muito longe temporalmente, possam transmitir aos engenheiros da manutenção um relatório completo do histórico do seu desempenho, assim como a localização de qualquer defeito que possa ter ocorrido durante o seu período de funcionamento. Ou que possam actuar contra condições potencialmente perigosas ou indesejáveis, tais como vibrações excessivas, ou mesmo, de realizar uma auto-reparação. Neste sentido, estaremos a caminho das estruturas ou materiais, com a capacidade de actuarem autonomamente, em função das acções exteriores a que possam estar sujeitas.

Os materiais ou estruturas que se vão aproximando de tais propriedades podem-se, desde já, designar de “inteligentes”, na medida em que podem oferecer a possibilidade de actuar na uma série de situações, não efectuadas até então, com a possibilidade de se tornarem mais ou menos “inteligentes”, em função das situações a que possam responder. As potenciais aplicações destes são extensas e muito variadas. O ambiente doméstico é também um potencial mercado para estes materiais ou estruturas, com a possibilidade de um “uso fácil” ou “facilidade de manuseamento” em aplicações diárias. Estes conceitos podem parecer, porventura, demasiado perfeitos e, por isso, mesmo, de difícil concretização. No entanto, existem pelo mundo inteiro vários grupos de investigação, desenvolvendo e testando estes produtos para um futuro muito próximo.

O conceito de materiais e estruturas inteligentes é, ainda, um conceito inovador, que tem estado continuamente envolvido em investigações desde que surgiu no início dos anos oitenta [1]. Inspirados pelos mecanismos da natureza, cientistas e engenheiros têm criado novos materiais e sistemas estruturais, cujo comportamento se parece muito

com os dos seres vivos. Novas estruturas inteligentes estão a surgir com maior frequência em aplicações comuns. Estas são muitas vezes designadas, alternativamente, por estruturas adaptativas. Como resposta às várias mudanças de condições internas e externas, estas estruturas inteligentes podem variar a sua configuração geométrica mas também as suas propriedades mecânicas.

Assim, por vezes e consequentemente, o termo "materiais inteligentes" não está perfeitamente definido, sendo frequentemente usado para descrever sistemas ou comportamentos de sistemas. Embora tenha havido aproximações para quantificar e classificar os diferentes níveis de inteligência nos sistemas, é da maior importância entender que nenhuma das classificações é estabelecida e usada como normalizada nas comunidades académicas, científicas ou industriais. Portanto, materiais inteligentes, materiais activos, materiais adaptativos, e ainda em alguns contextos os actuadores e os sensores, são quase sempre usados como interligados. Isto pode, por vezes, levar a alguma confusão como diferentes termos podem, na realidade, descrever o mesmo efeito ou propriedade de um material. Para se juntar a esta possível confusão os termos de dispositivo inteligente, sistema inteligente ou estrutura inteligente, são também muitas vezes usados.

Por materiais inteligentes pode, também, entender-se materiais auto-adaptativos, auto-sensores, e com memória, possibilitando dessa forma obter múltiplas funções dos materiais e estruturas. Estas características possibilitam um sem número de aplicações destes materiais em áreas tão diversas como a fabricação de materiais para a indústria aeroespacial, assim como para as infra-estruturas na construção civil e também na biomecânica, por exemplo.

### **2.1.1 – Campos de actuação dos materiais compósitos inteligentes**

O conjunto dos materiais e estruturas inteligentes está em rápida ascensão, com as inovações tecnológicas a surgir na engenharia dos materiais, com novos sensores, e actuadores, e muitos deles com integração mecânica. Assim, os materiais inteligentes podem-se entender ou agrupar segundo diversas formas, nomeadamente; materiais a

funcionarem como sensores ou actuadores; materiais que têm múltiplas respostas a um estímulo numa forma coordenada; materiais com características para actuarem quando surgem mudanças bruscas; materiais ou sistemas que reproduzem funções biológicas. Outras haveria, também, em função das aplicações, ou mesmo das acções a desenvolver. Todas elas serão plausíveis.

No exemplo da figura 2.1, estão representadas algumas das aplicações correntes, em que estão a ser implementados diversos dispositivos sensores, de forma às estruturas “comunicarem” melhor as solicitações a que são sujeitas. Refira-se que muitos deles têm por base os materiais compósitos.

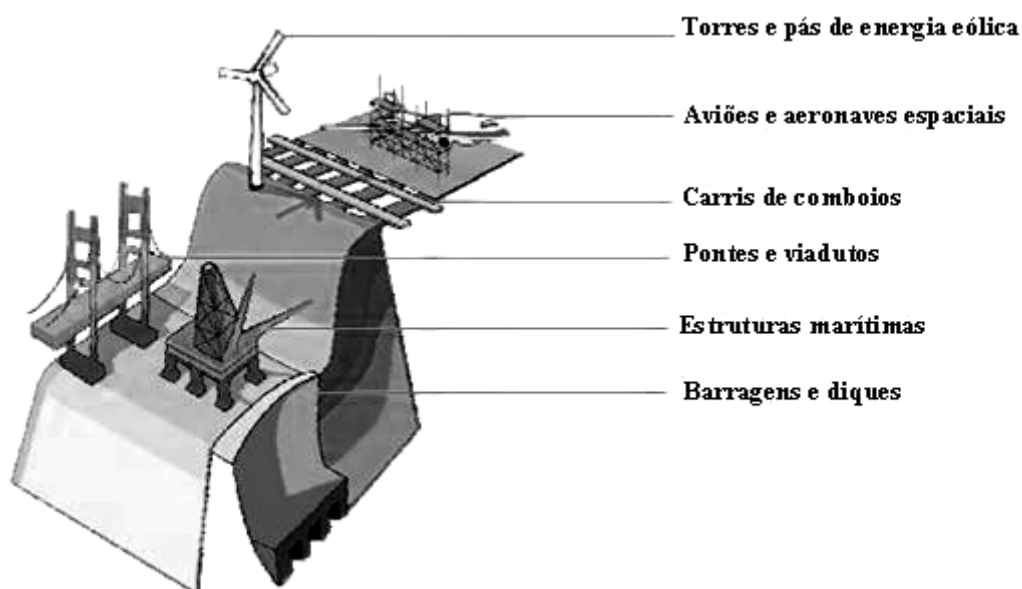


Figura 2.1 – Algumas das aplicações em que se usam sensores ópticos [2], em materiais compósitos.

A vibração e ruído nos aviões, nos comboios de alta velocidade e de uma grande parte da maquinaria industrial, tem um impacto directo na nossa sociedade, perturbando a saúde pública, e inevitavelmente os indivíduos que mais de perto interagem com o equipamento. O que de uma forma global, leva à alteração do estilo de vida, com repercussão também no meio ambiente. Assim, dada a possibilidade de poder controlar

melhor as vibrações e ruído, tornou-se uma das potenciais áreas de aplicação dos materiais e estruturas inteligentes. Outras aplicações com enorme potencial surgem, imediatamente, como seja a monitorização das estruturas aeroespaciais, nomeadamente na fase de lançamento, mas também em outras estruturas de uso mais comum, como as estruturas de engenharia civil, as pontes, viadutos, barragens e diques, por exemplo. Com um maior controlo destas situações será possível ter um melhor estado de segurança no dia-a-dia da nossa sociedade.

Um edifício em “betão inteligente” poderá sentir o movimento causado, na sua estrutura, por exemplo, por um tremor de terra, ou pela passagem de transportes pesados, como comboios de mercadorias ou de alta velocidade. Tal informação poderá ser obtida através dos sinais recebidos pelas fibras ópticas embebidas no betão e, por conseguinte, dar origem a um movimento coordenado por um conjunto de actuadores que façam parte da estrutura global, como seja, junto dos pontos de apoio dos pilares, ou mesmo, nos extremos das estruturas, fazendo com que encolham ou alonguem de acordo com os parâmetros definidos, para resistir e acabar com o movimento induzido na estrutura de betão. Na ocorrência de um tremor de terra, por exemplo, em que esta possa provocar fendas nas paredes de betão, este por sua vez poderá ter embebido pequenas “bolsas” de um material, que uma vez activado, dê origem a uma reacção química, e que automaticamente possa originar uma substância para preencher a fenda criada, minimizando alguma tensão provocada pelo seu surgimento. Esta situação assemelhar-se-ia ao processo de cicatrização no ser humano, também ele não necessita forçosamente de cuidados médicos. E o mesmo se poderia passar com outro tipo de materiais.

Imagine-se, por um momento, que as estruturas podem aceder ao seu estado de integridade e efectuar as suas próprias reparações, pontes e edifícios que podem comunicar o seu estado de integridade, aviões e naves espaciais que fazem pequenos ajustes em pleno voo, à medida que as condições se alteram [1,3-10]. Todas estas situações estão a verificar-se neste momento, através da evolução que se tem assistido na ciência dos materiais, na mecânica estrutural, na tecnologia dos sensores, nas novas técnicas de processamento de materiais, e assim como nos actuadores. Esta associação de materiais oferece a possibilidade de dotar as estruturas com um sistema de sensores e

actuadores, a um conjunto de aplicações que vão desde um simples robô, a estruturas da engenharia civil, com a possível expansão a todo o tipo de estruturas e de veículos.

Os materiais compósitos inteligentes e as estruturas adaptativas com potencialidades de sensor/actuador combinam o melhor das propriedades mecânicas dos materiais com a capacidade adicional de "sentir" e adaptar a uma resposta estática ou mesmo vibro-acústica. Estes materiais ou estruturas surgem como promissores na resolução de uma gama de problemas em sistemas de propulsão avançados, cujos desenvolvimentos estão a ser realizados pela engenharia aeroespacial [11-13].

### **2.1.2 – Analogia com os seres biológicos**

Nos últimos anos, a NASA (National Aeronautics and Space Administration), esteve a desenvolver um projecto inovador para aplicação em aeronaves, e que consistia na construção das estruturas com recurso a materiais inteligentes, sendo o objectivo principal o de proporcionar a modificação da estrutura da aeronave em pleno voo. Tratava-se de um projecto baseado nos seres vivos, nomeadamente no comportamento das aves, que pretendia aumentar a eficiência e performance das aeronaves no futuro [11]. Esse projecto teve como intuito desenvolver novos materiais, que poderão ser usados em aviões “inteligentes”, com a possibilidade de alterar a sua configuração, de acordo com as condições de voo. O projecto de pesquisa previa uma série de materiais, sensores e actuadores, que, trabalhando em conjunto, permitiriam á aeronave sentir literalmente o ambiente. Entretanto, esta tecnologia já está a surgir lentamente, com a criação de bombardeiros “mutantes”, com possibilidade de se modificarem para aviões mais ágeis caso seja necessário.

Uma variedade de novos dispositivos está a surgir no mercado, sendo progressivamente mais acessíveis financeiramente, como sejam os sensores e os actuadores. Estes últimos, por analogia com os seres biológicos, devem actuar nas estruturas como músculos, assim como os sensores devem actuar como os nervos. Dados os avanços tecnológicos ao nível das unidades de processamento, começa a surgir a possibilidade da “inteligência” das estruturas poder ser realizada através da

combinação entre os diferentes dispositivos, com recurso aos processadores, embora também eles possam ser embebidos na própria estrutura, e actuarem como cérebro da mesma.

A manifestação de estruturas e/ou materiais inteligentes é baseada na multidisciplinaridade tecnológica do material, das ciências de informação e da engenharia de estruturas. Hoje em dia é possível realizar um dispositivo electrónico integrado, com a faculdade de sentir e actuar com materiais compósitos em fibra reforçada. Assim o material compósito sensor, com o embebimento de sensores tais como, sensores em fibras ópticas, materiais piezoeléctricos e outros, terão funções de “sentir”, funções estas similares às dos nervos biológicos. Enquanto que o material actuador tomará a resposta necessária correspondente à informação dada pelo sensor, através de uma actuação que se assemelhará aos músculos. Os piezocerâmicos, ligas com memória de forma e materiais electro-reológicos, são alguns dos materiais mais comuns a poderem funcionar como actuadores.

### **2.1.3 – Compósitos inteligentes e a monitorização de integridade**

Todas as estruturas e máquinas realizadas pelo Homem têm tempos de vida finitos. Muitas dessas estruturas iniciam a degradação mal são colocados em operação. Processos como a corrosão, a fadiga, a erosão, e a sobrecarga, vão degradando-as até que deixam de corresponder às situações para que foram criadas. Dependendo do valor da estrutura, as consequências de uma possível falha em operação, e o custo da sua reparação dão origem a uma série de acções que podem ser tomadas:

- Se a estrutura é relativamente barata, e a sua reparação muito cara, então espera-se que acabe por si própria e depois é retirada de serviço.
- Se a estrutura tem um preço elevado e os custos de reparação em termos relativos não são muito elevados, então deixa-se a mesma andar em funcionamento até que seja necessária uma intervenção.
- Monitoriza-la, e analisá-la com alguma periodicidade, e decidir em função dos dados obtidos, se é necessário algum tipo de intervenção.

Este é, de facto, o tipo de estrutura com monitorização de integridade, que pode encaixar perfeitamente dentro do conjunto de estruturas ditas inteligentes. Tanto mais que, se adicionalmente a dotarmos de um conjunto de actuadores, além de monitorizar-se também poderá vir a actuar sobre si própria.

O processo de implementação de uma estratégia de detecção de dano para a indústria aeroespacial, engenharia civil assim como nas infra-estruturas de engenharia mecânica, é da mesma forma referido como monitorização da integridade estrutural. O que envolve a observação do sistema ao longo do tempo, usando amostras periódicas de medições de respostas dessa estrutura, quer elas sejam estáticas ou dinâmicas, a partir de um conjunto de sensores. A figura 2.2 apresenta um exemplo, no qual se efectua a monitorização em contínuo de uma ponte. A obtenção das informações de dano, a partir dessas medições e da análise estatística das mesmas, é usada para determinar o seu estado de integridade estrutural. Pode-se assim avaliar sobre uma possível intervenção, e que tipo de intervenção a realizar-se. Desta forma, podem-se efectuar planos de manutenção diferenciados e muito mais específicos, permitindo, por exemplo, manter a estrutura em funcionamento por períodos de tempo mais alargados.

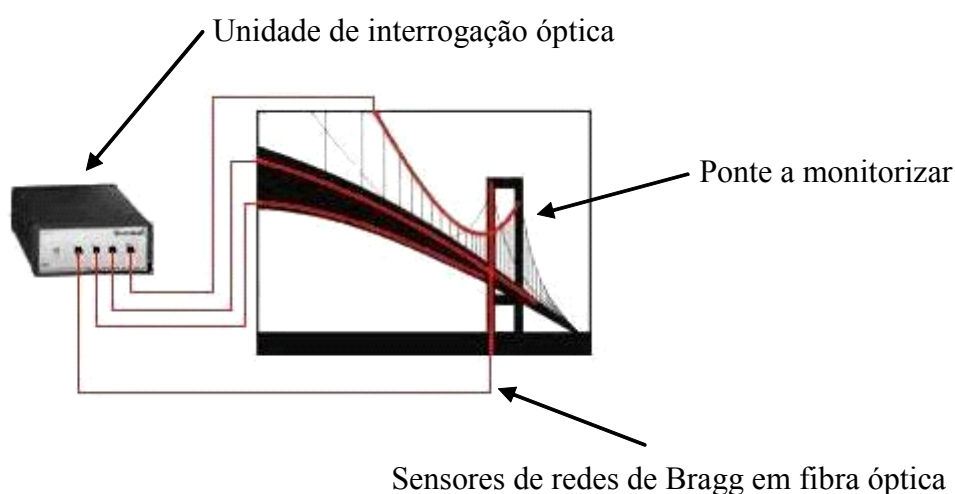


Figura 2.2 – Esquema simplificado da monitorização de uma ponte.



Muitas das estruturas, tais como barcos, pontes, viadutos, aviões, edifícios, podem de facto ser monitorizados durante o seu período de funcionamento. As consequências de um componente crítico ter um colapso, ou de um avião falhar em pleno voo, ou ainda de uma ponte ruir, é de tal forma preocupante, que são realizadas inspecções regulares, sendo que a maior parte são efectuadas por engenheiros experientes de forma a determinarem a integridade das estruturas e dos sistemas. O processo de inspecção implica muitas vezes custos elevados, e está sujeito a erros humanos, o que pode quer dizer que alguma manutenção pode ser desnecessária, dado que algumas falhas podem não ser detectadas. Alguns exemplos começam a surgir, como a monitorização de integridade de componentes de uma máquina, neste caso nas pás de um rotor de um helicóptero [14]. No entanto, este exemplo não tem equivalência na maior parte das estruturas. Trata-se de um exemplo isolado, mas dá uma ideia sobre o potencial das aplicações.

Existe uma necessidade clara de alterar este tipo de comportamentos, com a introdução de uma inspecção que pode ser contínua, e ao longo do seu tempo de vida. Um refinamento deste tipo de procedimento pode envolver um ajuste entre a estrutura de interesse, e o seu sistema de análise, conjuntamente com o sistema de sensores, de forma a permitir a monitorização e possível intervenção, para ser levada a cabo de uma forma contínua e automática. Certos parâmetros são medidos, dando a localização e a severidade dos danos nas estruturas, à medida em que vão ocorrendo. A monitorização da integridade estrutural em tempo real, permite ter um aumento na segurança, uma vez que as falhas sendo precocemente detectadas, não podem crescer para níveis perigosos, alterando dessa forma os intervalos das inspecções. Por outro lado não estão sujeitas ao comportamento e atitudes humanas, possibilitando custos mais baixos, através da substituição pré-planeada de uma manutenção dirigida para um serviço de prevenção. Os potenciais benefícios de um ambiente deste tipo, em que há monitorização de integridade estrutural, é de tal forma elevado, que, de uma forma global em todo o mundo, estão a decorrer um grande número de investigações, tendo em vista o desenvolvimento e melhoramentos das metodologias, por forma a que algumas estruturas tenham já um determinado grau de auto-reparação.

### **2.1.4 – Monitorização e inspecção não destrutiva**

Um sistema de monitorização da integridade estrutural pode consistir num conjunto de sensores e elementos de processamento, como uma rede de sensores que meça parâmetros relevantes, os quais podem ser de carga na estrutura, e aos quais possa ser feita uma correspondência a valores de tensão, a partir de transdutores ultra-sónicos, por exemplo, mas também de vibração, de corrosão, de temperatura, entre outros. O processamento de sinal e as rotinas de análise podem relacionar os dados obtidos pelos sensores, com a integridade da estrutura, apresentando um possível relatório à equipa de manutenção para que estes possam decidir por aumentar ou reduzir os prazos de uma possível intervenção.

Os requisitos necessários numa monitorização de integridade estrutural são muito restritos, uma vez que se pretende substituir os métodos de inspecção correntes, levados a cabo por operários com uma grande experiência. Considerando as exigências colocadas nos sensores, eles devem ser suficientemente sensíveis para detectarem as indicações de dano. Estes devem ser estáveis, duráveis e fiáveis durante todo o tempo de vida da estrutura que estão a monitorizar. A fiabilidade é crucial. Se um sistema de inspecção humano é substituído por um outro automático, devemos poder ter toda a confiança neste último. Estes sistemas não devem falhar detecções de dano, que supostamente têm por obrigação detectar. Eventualmente haverá a necessidade de criar condições de validação, para que não surjam falsos alarmes, ou uma situação de excesso de confiança.

Uma outra situação prende-se com condições financeiras, isto é, o custo de instalação do sistema de monitorização deve ser menor do que um regime de inspecção equivalente, a não ser que a segurança, ou os benefícios a alcançar ultrapassem os custos e o preço deixa de ser um factor determinante. Os sistemas de medição convencionais simplesmente não conseguem satisfazer todos os requisitos simultaneamente.

Considerando um elemento sensitivo de um sistema de monitorização de integridade estrutural, estes estão na primeira linha de implementação de muitos dos esquemas actuais. Podem ser usados para monitorizar cargas continuamente, permitindo

criar um mapa da sua evolução. Esta informação pode ser usada para verificação de determinadas condições assumidas, acerca do padrão de cargas ou combiná-los com modelos de fadiga, no sentido de prever um tempo de vida restante para a estrutura. Uma aplicação imediata pode ser a indicação de casos de carga excepcional, como é o caso dos tremores de terra nos edifícios, em pontes ou então nas pistas de aviação, dadas as aterragens serem por vezes demasiado violentas ou de forte impacto, e que podem causar qualquer dano e, por isso, sugerir que a estrutura seja submetida a uma inspecção detalhada, alterando assim um possível calendário da sua realização.

Com o aparecimento de novos materiais compósitos, resultantes dos diferentes processos de empilhamento possíveis, estes podem propiciar o desenvolvimento de delaminação, situação que representa uma das principais preocupações nas aplicações em Engenharia. Métodos de vibração baseados na detecção de variações de frequência associada á presença da delaminação ganharam recentemente alguma popularidade [15]. Esta é uma área relativamente nova, e que consiste na inspecção não destrutiva, podendo em muitos casos começar a ser monitorizada logo desde a produção, estando muitas das vezes associada aos novos materiais, tendo estes capacidades adaptativas, e muitas vezes também designados de materiais e/ou estruturas inteligentes.

Os sensores em fibra óptica são ideais para a monitorização contínua a longo prazo da integridade estrutural. Embora estes, em termos práticos, sejam relativamente recentes está, no entanto, a verificar-se que são cruciais em parte das aplicações de monitorização da integridade de uma estrutura.

Os materiais mais populares usados como actuadores, são os materiais piezoelétricos, para além das ligas com memória de forma, assim como os electro-reológicos. Embora todos estes materiais sejam activos, os piezoelétricos são, na maior parte das vezes, usados porque têm uma resposta electromecânica rápida e necessitam de poucos recursos de potência, para originar forças relativamente altas.

## 2.2 – Embebimento de sensores

Existem alguns aspectos a ter em conta com a inclusão das fibras ópticas nas estruturas compósitas. Um dos aspectos, diz respeito ao próprio embebimento das fibras ópticas nas estruturas durante o processo de fabricação e o relacionamento da fibra óptica com o meio que a vai envolver. Para além da situação da interface, entre a fibra óptica com e sem revestimento exterior, na zona do sensor, e o material que a envolve. Um outro aspecto a ter em conta é a integridade do sensor, nomeadamente em termos de transmissão de sinal. Fundamentalmente, quando pode estar em jogo a resistência mecânica da fibra óptica quando comparada com a resistência do material que a envolve.

Estes aspectos têm importância pelo facto de poderem condicionar o sinal obtido, dado que este pode ser o resultado das diferentes interações entre os diferentes aspectos envolvidos, desde a situação em que a fibra é colocada no material compósito, até à situação final em que se obtém uma determinada estrutura compósito com os sensores ópticos embebidos. Várias são as situações em que podem ocorrer perturbações no percurso que a luz faz ao longo da fibra óptica, ou seja, podem ocorrer durante o processo de produção do compósito, situações em que se pode verificar estrangulamento da luz, devido por exemplo às microcorvaturas a que a fibra possa estar sujeita. Dado que esta, pelo facto de se encontrar dentro do compósito, vai estar sujeita às mesmas cargas que este, logo sujeita às mesmas forças de pressão a que este é submetido, no sentido de obter a consistência necessária. Também durante o período de arrefecimento, as forças de contracção experimentadas pelo material hospedeiro poderão influenciar as características do sinal obtido na fibra óptica. Posteriormente, será apresentada uma pequena alteração introduzida na fase de produção do material compósito, e que se traduziu por se obter bons resultados finais, no espectro da luz, obtido pelas fibras ópticas. Situação esta, que pode levar-se a considerar a metodologia utilizada, como uma alteração eficaz, quando se pretende obter um conjunto de materiais, ou placas sensoras, cuja espessura final não ultrapasse os 400  $\mu\text{m}$ .

O sensor ou placas sensoras obtidas podem ser usados para fazer uma monitorização em tempo real, de parâmetros tais como a temperatura, a pressão, o grau de cura da resina, a composição química e mesmo a viscosidade.

### **2.2.1 – De fibra óptica**

Com o forte crescimento das indústrias de optoelectrónica e comunicações ópticas, a evolução da tecnologia das fibras ópticas tem tido um desenvolvimento que permite o constante progresso nos sensores em fibra óptica.

Esse desenvolvimento, em associação com os avanços nos materiais compósitos, abriu um novo campo para as estruturas inteligentes. A metodologia de processamento dos materiais compósitos garante um fácil embebimento dos sensores em fibra óptica, no material durante o fabrico.

Os sensores em fibra óptica são atractivos por oferecerem uma série de vantagens em comparação com os sensores eléctricos convencionais [16-18], tendo como principais propriedades as das fibras ópticas, tais como transmissão com baixas perdas, imunidade a interferência electromagnética, baixo peso e isolamento eléctrico.

Pelo facto de resistirem a altas temperaturas, podem operar em diferentes meios químicos e aquosos permitindo medições em áreas não acessíveis de um outro modo. Ao embeber sensores em fibra óptica em materiais compósitos, é possível melhorar o processo de fabrico, dado que se podem monitorizar parâmetros como a temperatura, a pressão, a deformação, o grau de cura, a viscosidade e o conteúdo químico [16]. Podem também, ser aplicados na avaliação da integridade de uma estrutura em serviço. Na literatura, são mencionados diferentes sensores em fibra óptica utilizados com sucesso na avaliação de dano em materiais compósitos [19,20].

### 2.2.1.1 – Embebimento da fibra óptica

Segundo alguns autores, uma das questões de maior interesse, prende-se com o embebimento das fibras ópticas nas estruturas compósitas [21,22], de tal forma que a integridade estrutural não seja comprometida, assim como a zona de interface entre a fibra óptica e o material envolvente, permitindo uma medição precisa das grandezas de interesse. Para as temperaturas baixas ou moderadas, os revestimentos à base de sílica, em que o ponto de fusão é da ordem dos 1400 °C, são as mais apropriadas [23,24]. De uma forma geral, o limite prático é algures mais baixo, por volta dos 1000 °C. Será a partir desta zona de temperaturas que se verificará uma migração de dopantes, com início na zona do núcleo da fibra óptica, tornando-se assim um problema mais sério. A maior parte das aplicações que usam revestimentos à base de sílica, têm uma gama de actuação aproximadamente até os 700 °C, garantindo desta forma uma margem de segurança [25,26].

Para temperaturas mais elevadas, e para sensores, em que se pretenda que venham a operar por volta dos 2000 °C, o revestimento terá de ser feito em safira [27,28], com o qual espera-se que a fibra óptica tenha um bom desempenho, sendo esta uma zona de temperaturas onde muito poucos sensores conseguem sobreviver.

No embebimento da fibra óptica, torna-se importante o tipo de revestimento que ela possui. Este deve formar uma interface apropriada entre a fibra óptica e o material hospedeiro. No caso dos materiais compósitos, é importante ter em atenção os diferentes diâmetros da fibra óptica e o tipo de revestimento usado [22,24,25]. Geralmente, é necessário ter a preocupação de ir colocando, sempre que possível, a fibra óptica ao longo das fibras do material compósito, paralelamente às camadas adjacentes do reforço do compósito. Este procedimento, irá minimizar a incompatibilização do conjunto, melhorando a integridade, no entanto, será menos crítico à medida que o diâmetro da fibra óptica vai diminuindo.

Tendo em atenção o diâmetro relativamente reduzido da fibra óptica, será possível embeber um número significativo de fibras ópticas, a distâncias relativamente perto umas das outras nos materiais compósitos, sem que com isso haja uma perda de informação quando das medições das grandezas esperadas. Dado que o material

compósito funciona como um todo, influenciando todo o meio, e de igual forma, a todas as restantes fibras envolvidas no material, assim como a envolvente às fibra ópticas, como se espera.

Existem aplicações de custo relativamente baixo, e que são também muito interessantes, envolvendo somente a fibra óptica simples, uma vez que esta, pode ser usada como sensor fornecendo informação associada à transmissão de luz, podendo também estar associada ao conceito de microcurvatura [29-34], e mesmo à sua interrupção, caso da rotura da fibra óptica [10].

Se uma fibra óptica é ligeiramente curvada, numa curta distância, uma pequena quantidade de luz pode perder-se passando do núcleo para a bainha da fibra. As perdas por microcurvatura têm representado sempre um problema, no que toca à questão do embebimento em materiais compósitos. No entanto, este fenómeno tem sido aproveitado na concepção de sensores em fibra óptica que adaptaram o conceito de microcurvatura para a medida de vários parâmetros físicos, tais como a pressão ou a temperatura [35-37]. No caso do sensor de microcurvatura, a medição da quantidade de luz transmitida, pela fibra óptica, tem a ver com a forma como esta se encontra colocada no meio dos materiais compósitos, isto é, com a forma como eles se comportam em relação às solicitações que são aplicadas.

### **2.2.1.2 – De redes de Bragg e interferómetros**

Há, no entanto, dois tipos de sensores que surgem como os mais promissores em termos de sensibilidade e resolução espacial, e são também aqueles que têm merecido uma maior atenção em termos de aplicação, uma vez que permitem um fácil embebimento, e que são as redes de Bragg [38-41], e os interferómetros de Fabry-Pérot [42-49]. Este tipo de sensores apresentam também uma grande vantagem, e que consiste na existência de uma entrada e de uma saída, ou ainda, um único ponto que é simultaneamente de entrada e de saída, do sinal do sensor na estrutura, além de que, têm sinais com respostas espectrais com poucas perdas associadas aos conectores.

### **2.2.1.2.1 – De redes de Bragg**

A informação obtida pelas redes de Bragg em fibra óptica está directamente relacionada com o comprimento de onda, que é um parâmetro absoluto. O sinal obtido não depende directamente dos níveis de intensidade de luz, perdas nos conectores e acopladores ou potência da fonte óptica. Esta é uma das vantagens mais importantes deste tipo de sensor.

O facto da informação estar directamente ligada ao comprimento de onda facilita, também, a multiplexagem, o que permite medir diferentes grandezas físicas simultaneamente utilizando uma única fibra óptica, fazendo desta forma com que cada sensor fique associado a uma faixa disponível do espectro. Isto possibilita a utilização de sensores densamente multiplexados (também chamados de sensores quase distribuídos), de deformação por exemplo, associando cada faixa do espectro a uma localização espacial.

Os sensores de redes de Bragg em fibra óptica, embebidos em material compósito revelaram um grande potencial na medição simultânea de deformações e temperatura [50-52]. Este tipo de sensores e o seu princípio de funcionamento serão posteriormente apresentados num capítulo dedicado às fibras ópticas. Na maioria dos ensaios realizados, efectuou-se a medição da deformação em função das solicitações impostas aos provetes.

### **2.2.1.2.2 – De interferómetros Fabry-Pérot**

Os interferómetros Fabry-Pérot em fibra óptica são sensores com uma maior sensibilidade do que os referidos no ponto anterior, e de forma mais notória a fenómenos transitórios. Estes são uma das formas mais simples de configuração de interferómetros. E tal como os sensores anteriores, baseiam-se na interferência de ondas electromagnéticas. De uma forma sucinta, pode-se dizer que consistem em dois planos paralelos na forma de dois espelhos, obtidos através de cortes a 90° da fibra monomodo, sendo que os cortes são perpendiculares à direcção de propagação da luz, separados por uma distância  $L$ . Esta distância entre os dois planos pode variar entre alguns



micrómetros e alguns centímetros. Os espelhos paralelos são alinhados com a sua normal, na direcção de propagação da luz. Dentro da cavidade irão ocorrer múltiplas reflexões, com a luz a ser constantemente enviada para a cavidade, e também constantemente reflectida pelos espelhos.

O interferómetro óptico de Fabry-Pérot é muito sensível a vibrações, pelo que tem sido usado para esse efeito, mas também para a detecção de ultra sons (emissão acústica) [53]. Nesse caso, as ondas que se propagam no interior do material compósito, e sendo elas resultantes de uma determinada acção que a estrutura sofreu, vão provocar uma determinada instabilidade na cavidade, a qual resultará em variações na distância entre os dois espelhos. A estas variações corresponderão alterações do padrão de interferência devido à modulação de fase pelas ondas elásticas.

### 2.2.2 – De Piezoeléctricos

Os princípios fundamentais relativos ao comportamento destes materiais, são conhecidos há muito tempo, mas apenas recentemente com a evolução tecnológica foi possível empregá-los nos ditos sistemas inteligentes [54,55]. O efeito piezolétrico foi documentado por Pierre e Jacques Curie em 1880, no entanto, só em 1940 os cristais piezoeléctricos foram aplicados em aparelhos de rádio.

Os materiais piezoeléctricos, com designação comercial PZT, formados à base de zirconato-titanato de chumbo cuja fórmula geral é  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ , pertencem à classe dos dieléctricos que exibem deformações significativas como resposta a um campo eléctrico que lhes seja aplicado e, inversamente, produzem polarização eléctrica em resposta às tensões mecânicas aplicadas. Materiais piezoeléctricos sintéticos como sejam as cerâmicas e polímeros, por exemplo, podem ser produzidos através de polarização de um substrato apropriado mediante aplicação de um forte campo eléctrico a temperaturas elevadas. Numa forma esquemática, pode-se ver uma parte do processo que se ilustra na figura 2.3.

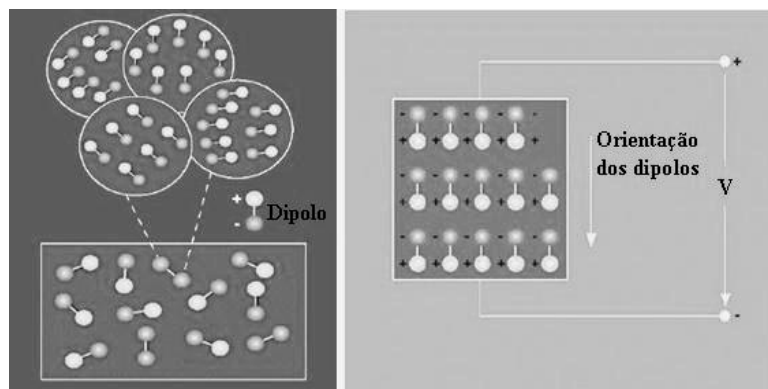


Figura 2.3 – Esquema do processo de polarização.

A polarização tem por efeito alinhar parcialmente os dipolos eléctricos, no domínio microscópico, o que tem como resultado uma polarização macroscópica que favorece o acoplamento electromecânico. Como resultado deste acoplamento, o material deforma-se em resposta a um campo eléctrico externo, conferindo ao material a capacidade de actuação.

A capacidade de sensor resulta do efeito piezoeléctrico directo, segundo o qual, a aplicação de solicitações mecânicas externas ao material, provoca a rotação dos dipolos que se encontravam alinhados na direcção oposta, surgindo uma distribuição de cargas eléctricas. Na figura 2.4, podemos ver em esquema, a representação de um piezoeléctrico.

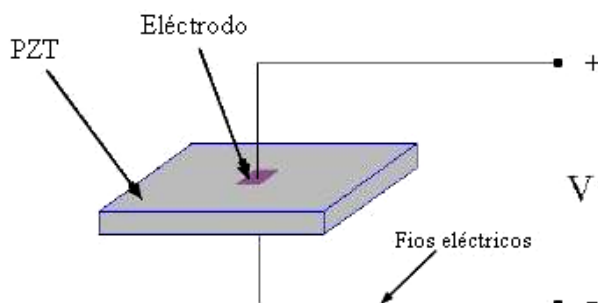


Figura 2.4 – Representação esquemática de um piezoeléctrico (PZT). Os dipolos podem alterar-se em função da solicitação a que forem sujeitos.

### 2.2.2.1 – Efeito piezoelétrico directo e inverso

A relação entre campo eléctrico e a deformação é aproximadamente linear para baixas intensidades do campo eléctrico, o que é uma característica vantajosa quando se utiliza o efeito piezoelétrico em sistemas de controlo [56]. Entretanto, para maiores intensidades do campo eléctrico, ocorre um fenómeno de saturação da polarização, com a inversão dos dipolos eléctricos. Situação que leva à histerese e a uma relação não linear entre o campo eléctrico e a deformação, facto que pode causar dificuldades quando se faz uso dos actuadores piezoelétricos, em procedimentos de controlo que requerem elevadas intensidades do campo eléctrico. Todavia, a maioria das aplicações práticas limitam-se ao regime linear.

As relações matemáticas que modelam o efeito piezoelétrico directo e inverso no regime linear são:

Efeito piezoelétrico directo:

$$D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n + d_{mkl} \sigma_{kl} \quad (2.1)$$

Efeito piezoelétrico inverso:

$$e_{ij} = s_{ijkl}^E \sigma_{kl} + d_{mij} E_j \quad (2.2)$$

onde  $D_m$  e  $E_n$  são os vectores deslocamento eléctrico e campo eléctrico, respectivamente,  $\varepsilon_{mn}^T$  é o tensor das constantes dieléctricas (permissividades eléctricas),  $d_{mkl}$  é o tensor das constantes piezoeléctricas,  $s_{ijkl}^E$  é o tensor das flexibilidades mecânicas medidas com um campo eléctrico constante,  $e_{ij}$  é o tensor das deformações e  $\sigma_{kl}$  é o tensor das tensões mecânicas. Nas equações (2.1) e (2.2), de acordo com a convenção de Einstein comumente empregada na notação indicial, efectua-se a soma dos termos indicados pelos índices repetidos. É de destacar que o efeito piezoelétrico directo, expresso pela equação (2.1), é usado na concepção de sensores, ao passo que o efeito piezoelétrico inverso, representado pela equação (2.2), é usado na construção de actuadores.

### 2.2.2.2 – Condicionantes dos piezoelétricos

Um dos cuidados a ter em conta, quando se utilizam os materiais piezoelétricos, é o efeito da temperatura que envolve os materiais. Essa não deve ultrapassar um valor limite denominado temperatura de Curie, a partir do qual há uma despolarização espontânea do material e, conseqüentemente, uma perda das características piezoelétricas. Contudo, para temperaturas inferiores à temperatura de Curie, verifica-se uma relativa insensibilidade das características do material em relação às variações de temperatura, facto que, constitui uma das principais vantagens do uso de elementos piezoelétricos para o controlo e medição de vibrações, de deformação, e também de detecção de falhas estruturais.

Uma outra vantagem inerente aos materiais piezoelétricos resulta da possibilidade da sua utilização numa ampla gama de aplicações. Tal característica resulta, em parte, do facto de existir uma variedade de materiais naturais e sintéticos, com capacidade piezoelétrica. De entre eles, os mais frequentemente utilizados são os piezocerâmicos dos quais se destacam as cerâmicas piezoelétricas, sendo estas as mais utilizadas a nível comercial, e os piezopolímeros, e destes, o que se destaca é o *Polyvinylidene fluoride* (PVDF, designação comercial), fabricados na forma de folhas finas, que contrariamente aos piezocerâmicos, são flexíveis, podendo ser cortados com formas variadas, de modo a se adaptarem a cada aplicação. Podem ser fixos, através de adesivos apropriados, em estruturas flexíveis sujeitas dinamicamente a grandes deflexões, sem alterar-lhes as características elastodinâmicas. São bastantes mais sensíveis às cargas externas que os piezocerâmicos, sendo por isso mais aplicados como sensores [57,58].

Os materiais piezoelétricos são usados quer como sensores, quer como actuadores, ou ambos, dado que, em função das aplicações, pode-se recorrer ao efeito piezoelétrico directo, inverso ou a ambos. Devido à sua maior adaptabilidade e também ao facto de serem materiais geralmente leves, com facilidade em serem integrados nas estruturas tornando-os, assim, muito atractivos para o controlo estrutural uma vez que podem estar ligados a todas as partes móveis. No entanto, na aplicação deste tipo de material actuador deve-se ter em atenção que o material deve ter a possibilidade de alteração de forma, assim como de frequência natural de vibração, ou outra

característica mecânica como resposta às mudanças das condições que o rodeiam, como seja, a de temperatura, campo eléctrico e/ou campo magnético, por exemplo.

Com o embebimento de um actuador piezoeléctrico na estrutura, ou mesmo por ligação à superfície da estrutura, pode-se obter um controlo estrutural. A situação mais usual é, de facto, a fixação por colagem. No entanto, neste trabalho o piezoeléctrico usado foi embebido no material compósito. A operação em si demonstrou um grande potencial, apesar de ter sido um estudo preliminar, para o qual há ainda muito espaço para expansão e estudo, além das enormes potencialidades que se admitem obter, mas que em função do objectivo inicial deste trabalho e da cronologia de ocorrência dos acontecimentos, não permitiu ir mais além, ficando assim como um dos objectivos para desenvolvimentos futuros.

Uma das aplicações dos piezoeléctricos pode ser na detecção de uma área danificada, a qual pode ser localizada usando uma série de sensores deste tipo. A sua grande funcionalidade deve-se à velocidade de deslocação com que as vibrações se propagam através do material compósito. Se o sensor for colocado a uma pequena distância do possível problema, as vibrações irão atingir certos sensores primeiro do que outros. Assim, através da análise da diferença de tempos de chegada das ondas nos diferentes sensores, será possível com recurso a uma triangulação, localizar a zona de dano ou que apresenta comportamento anormal.

Um método usado na análise não destrutiva de estruturas compósitas é realizado efectuando-se uma montagem, por colagem, de um conjunto de piezoeléctricos. Estes sensores são, então, usados para detectar os "comportamentos" vibracionais provenientes das estruturas compósitas. As vibrações vão causar, assim, pequenas correntes eléctricas, as quais são registadas, dando a possibilidade de realizar um mapa das vibrações na estrutura, e porventura detectar as zonas mais críticas. Os comportamentos anormais podem ser registados, por exemplo quanto à fadiga, ou a impactos acidentais que possam causar nas fibras de reforço dos compósitos um dano irreversível de forma a separá-las da matriz.

Alguns destes materiais piezoelétricos têm como grandes exemplos de aplicações, as células de carga, sensores de velocidade e acelerómetros, sistemas de ignição, controlos remotos e microfones, com a utilização do efeito piezoelétrico directo. A utilização de efeito piezoelétrico inverso é feita, por exemplo, em sistemas de micro-posicionamento, em sistemas de correcção dentária, e em impressoras a jacto de tinta. O simultâneo dos efeitos piezoelétricos directo e inverso, ocorre em sonares, no controlo de forma activo das estruturas, no controlo vibracional e acústico das estruturas [59].

## **2.3 – Outros sensores/actuadores utilizados em materiais inteligentes**

### **2.3.1 – Materiais e ligas com memória de forma**

As primeiras ligas com memória de forma apareceram nos anos 50, e ganharam um novo alento a partir da descoberta, por volta dos anos 60, das ligas com memória de forma em níquel-titânio (TiNi), obtida no Naval Ordnance Laboratory, nos Estados Unidos [60].

A primeira utilização que permitiu ganhar alguma notoriedade, nos anos setenta, foi em dispositivos térmicos. Com o TiNi produzido era, então, fácil converter calor em energia mecânica, à temperatura da água em ebulição. Nesta altura foram vários os inventores que produziram engenhos que trabalhavam por efeito térmico [60].

As ligas com memória de forma são uma classe especial de materiais adaptativos que podem converter energia térmica directamente em trabalho mecânico. Uma variedade de ligas, quando correctamente misturadas, podem exibir o efeito mencionado por aplicação de tratamentos térmicos, repetidamente. O efeito de memória de forma num sentido ocorre quando uma destas ligas especiais é deformada mecanicamente a baixas temperaturas, sendo depois aquecida acima da temperatura de transição crítica, o que resulta na reestruturação da forma “de memória” inicial. Alternativamente, as ligas

com memória de forma podem ser treinadas para transformar-se nos dois sentidos, isto é, o efeito de memória de forma, dado que quando se dá o aquecimento da liga com memória de forma, ela transforma-se numa forma memorizada, enquanto por arrefecimento resulta na transformação numa segunda forma diferente da primeira.

As ligas com memória de forma constituem um grupo de compostos metálicos que possuem a capacidade de desenvolver e recuperar deformações relativamente grandes (aproximadamente 10%) sem apresentar deformações plásticas. Esta característica é devida, em grande parte, à capacidade que estes materiais possuem de desenvolver transformações de fase na presença de tensões mecânicas aplicadas e/ou variações de temperatura. Embora estes materiais possam ser considerados como uma tecnologia emergente, alguns destes já estão comercialmente disponíveis e têm sido usados em aplicações de engenharia. Deste grupo, os mais populares são, sem dúvida, a liga de níquel-titânio conhecida por Nitinol (TiNi) e a liga de cobre, zinco e alumínio (CuZnAl) [54]. O Nitinol tem aplicações em dispositivos de alto desempenho, com deformações recuperáveis na faixa dos 6%, enquanto que a liga de CuZnAl funciona satisfatoriamente nas condições em que os carregamentos cíclicos são baixos, com deformações recuperáveis de aproximadamente 2%.

As ligas com memória de forma têm certas características que as tornam apropriadas para certas aplicações, dado que são altamente adaptativas, compactas, de baixo peso, e com uma elevada razão entre a força e o peso. Assim, os dispositivos à base de ligas com memória de forma provaram a sua importância em sistemas dinâmicos no controlo de vibrações de baixa frequência em sistemas flexíveis.

Os actuadores com memória de forma são usados quando uma grande força e movimento são necessários. Desde a descoberta dos materiais com memória de forma em níquel-titânio, que um grande numero de invenções foram realizadas em aplicações no domínio da medicina, da engenharia aeroespacial, do automóvel, e em produtos para o consumidor normal, com uma gama de actuação desde os micrómetros até aos metros.

Um exemplo de grande utilidade consiste em utilizar as ligas com memória de forma, sob a forma de fios colocados no interior de um material compósito. Assim, estes

podem ser previamente solicitados mecanicamente e deformados a baixa temperatura. Elevando a temperatura, procede-se à sua descarga, na qual podem gerar uma deformação residual. Uma vez embebidos no material compósito, os fios podem ser aquecidos por efeito Joule para recuperação da deformação residual. Como os fios da liga com memória de forma, são restringidos no movimento devido ao seu embebimento no material compósito, poderão obter-se tensões mecânicas.

As aplicações práticas das ligas com memória de forma incluem: sistemas de abertura de antenas e painéis solares de satélites, acoplamentos de tubos, detectores de incêndio, em janelas de vidro ou visores aplicados a dispositivos médicos, especialmente em fios para guias de cateter e arcos dentários, bem como sensores/actuadores para sistemas de ar condicionado. Nas aplicações em sistemas de controlo semi-activo de vibrações, as ligas podem ainda ser usadas na confecção de molas e amortecedores com características variáveis [54]. Nas transmissões de alguns dos automóveis do grupo Daimler-Benz, uma válvula de TiNi é usada para compensar a viscosidade em função das alterações de temperatura do lubrificante.

Na medicina, são vários os exemplos de aplicação destes materiais. São usadas placas de Ni-Ti, em substituição dos ossos fracturados, em cateteres para diagnóstico, mas também em aparelhos de correcção dentária [61]. Em aplicações industriais e domésticas, já começaram a surgir uma variedade de válvulas anti-queimadura. Elas “sentem” a temperatura da água que é usada num chuveiro, por exemplo, interrompendo a sua passagem se for atingido um nível perigoso para o uso do utilizador. São também utilizadas em juntas para tubagens. Na aeronáutica, desde há mais de uma década, são usadas nas chamadas “asas inteligentes” [61].

Estão a surgir uma série de equipamentos, designados de micro-equipamentos dadas as suas dimensões, uma vez que muitos deles são ainda menores do que um milímetro em tamanho. Estes equipamentos apresentam algumas particularidades como sejam, por exemplo, a eficiência termodinâmica.

De uma forma resumida, podem-se estabelecer as seguintes características para as ligas com memória de forma, em termos de vantagens, podemos ter:



- A possibilidade de produzir equipamentos com dimensões reduzidas, tornando mais fácil o embebimento nas estruturas compósitas.
- Activação termica de diferentes formas, por efeito Joule, por meio de um fluido que seja aquecido à distância por laser, por exemplo.

Existem, no entanto, algumas limitações práticas. Por exemplo, em aplicações dinâmicas que requeiram aquecimento e arrefecimento dos fios para iniciar e parar o processo de recuperação, as velocidades de aquecimento e arrefecimento tornam-se num factor limitativo. Em termos de desvantagens, temos essencialmente, respostas mais lentas em comparação com outros materiais inteligentes, facto que limita a sua utilização em aplicações de baixas frequências.

### 2.3.2 – Fluidos electro-reológicos

Os fluidos electro-reológicos fazem parte de uma ampla classe de dispersões fluidas exibindo o chamado “efeito Winslow”, em homenagem ao primeiro investigador que realizou experiências sistemáticas sobre o comportamento de tais fluidos [60] e que apresentam significativas e reversíveis alterações nas suas características reológicas, quando submetidos a um campo eléctrico externo [60]. Os fluidos electro-reológicos são dispersões coloidais de partículas sólidas num meio fluido isolante, em que as dimensões das partículas sólidas são da ordem de 1  $\mu\text{m}$  a centenas de micrómetros, e que são muito superiores às dimensões características das partículas do solvente.

Os diferentes tipos de combinações entre o solvente e o soluto têm também propriedades electro-reológicas, entre eles podem-se ter, por exemplo, partículas inorgânicas de sílica e óxidos metálicos ou partículas orgânicas de celulose microcristalina e resinas iónicas em óleo além de querosene ou hidrocarbonetos hydrogenados. Em todos os casos, as dispersões usualmente consistem na utilização de um solvente líquido não condutor de baixa viscosidade e num soluto de partículas sólidas não abrasivas, e não condutoras ou semicondutoras, porém polarizáveis. Frequentemente, as partículas sólidas são recobertas com compostos de activação orgânicos, poderá ser usada a água ou outros compostos polares, como o etanol, para

aumentar a capacidade de polarização. A resposta electro-reológica é devida a uma forma de polarização induzida e, consequente interacção entre as partículas.

A utilidade dos fluidos electro-reológicos como materiais inteligentes resulta da possibilidade de se alterar a tensão limite de cisalhamento e a viscosidade mediante a aplicação do campo eléctrico externo. Assim, há um grande potencial para a utilização destes fluidos, entre as quais, podem-se ter as seguintes aplicações: embraiagens com accionamento eléctrico bombas e válvulas hidráulicas e juntas robóticas de pequenas dimensões, por exemplo [60].

Os fluidos activos podem responder a um campo eléctrico ou a um campo magnético com uma mudança na viscosidade. Fluidos electro-reológicos são fluidos activos que respondem a campos eléctricos, enquanto que os fluidos magneto-reológicos respondem a campos magnéticos. Assim, estes últimos, têm bases de funcionamento muito idênticas às dos electro-reológicos. Os fluidos activos podem adaptar-se e responder quase instantaneamente e têm sido usados em amortecedores, válvulas, embraiagens e aplicações travão com poucas ou nenhuma partes móveis [60].

### **2.3.3 – Materiais magnetorestritivos e electrorestritivos**

Estes materiais sólidos alteram a sua forma inicial, deformando-se mecanicamente, quando sujeitos a campos magnéticos ou eléctricos externos. Ligas magnetorestritivas de térbio, disprósio e ferro, apresentam uma deformação de sensivelmente 0,1%, para uma energia de 20 kJ/m<sup>3</sup>[60]. A dificuldade em controlar os campos magnéticos limita a utilização deste tipo de materiais. Praticamente todos os materiais electrorestritivos, têm ordens de grandeza ínfimas. Um dos materiais típicos é a liga de chumbo, magnésio e níbio (PMN).

O melhor candidato do material magnetorestritivo e também o mais promissor correntemente é o Terfenol-D, uma liga de ferro com elementos de terras raras, como sejam o Terbium e o Disproson. O Terfenol-D é conhecido como um gigante dos materiais magnetorestritivos, dado que suporta tensões elevadas, quando uma peça deste

material é exposta a um campo magnético na ordem dos 1000 Oersted [60]. Fazer passar uma corrente alternada através de um enrolamento de solenóide, enrolado à volta da peça de Terfenol-D é uma simples técnica para aplicar campos magnéticos bi-direccionais à peça em questão. Actuadores comercialmente disponíveis têm uma possibilidade de deslocamento total de 0,1% ( $100 \mu\epsilon$ ), sendo capazes de produzir forças na ordem dos 1750 N, e a operar a frequências até 20 000 Hz [60]. Os transdutores de Terfenol-D têm sido usados com sucesso para o posicionamento de projectores de sonar (500 – 2 000 Hz), isoladores (15–20 Hz), suportes de absorção de choque, e também em aplicações médicas, como o imitar dos batimentos de um coração [60].

Os materiais magnetorestritivos e electrorestritivos podem ser incorporados em compósitos multifuncionais para adaptar-se quer às deformações mecânicas assim como sentir essas mesmas forças ou deformações. Quando os dispositivos à base destes materiais, e em micro-escala, são distribuídos por um material anfitrião, os materiais magnetorestritivos e electrorestritivos podem actuar como sensores distribuídos num compósito.



# Capítulo 3

## 3 – Materiais compósitos e métodos de produção

### 3.1 – Introdução

Um material compósito consiste na junção de dois materiais de diferentes naturezas que se completam e permitem a obtenção de um novo material cujas características e desempenho são melhores do que os constituintes considerados em separado. Na situação mais geral, um material compósito consiste em uma ou mais fases descontínuas distribuídas numa única fase contínua. No caso de várias fases descontínuas de diferentes naturezas, o compósito é, então, designado híbrido. A fase contínua é designada por matriz, e a fase descontínua é designada de reforço.

Os materiais compósitos, na maioria das aplicações, têm uma matriz que é feita de um material polimérico podendo também ser de metal ou cerâmica. O reforço pode ser constituído por partículas, fibras moídas, curtas ou longas, podendo estas ser de carbono, vidro, aramida (ou Kevlar<sup>®</sup>), mas também metálicas, fibras de polímeros e fibras naturais, por exemplo.

Na maior parte dos casos, o reforço é mais duro, rígido e resistente que a matriz, e tem dimensões muito reduzidas. É, também, de salientar que a natureza está repleta de materiais compósitos, como por exemplo, a madeira, que é um compósito natural “reforçado” com fibras celulósicas. O próprio corpo humano é, também, um bom exemplo de um material compósito natural.

Os materiais compósitos de matriz polimérica têm conhecido um forte crescimento nas mais diversas aplicações industriais [62]. São também a base do trabalho aqui apresentado. A utilização destes materiais generalizou-se e são cada vez mais comuns as aplicações nos domínios do desporto, bem como nas indústrias da construção, da aeronáutica e dos transportes e, ainda, com algumas ramificações nas artes plásticas. Uma das razões que justifica esta inserção nas indústrias, é motivada por uma série de factores que reflectem as propriedades desses materiais, como sejam uma baixa densidade, elevada resistência específica à rotura e rigidez específica, além de uma boa resistência à corrosão.

Uma segunda razão que justifica esta inserção na indústria, advém dos materiais compósitos serem heterogéneos, o que pode significar a escolha e a disposição dos constituintes, caso das fibras e resinas, tornando-se numa mais valia ao permitirem conferir a uma determinada estrutura as qualidades pretendidas e que, eventualmente, seriam de difícil obtenção, senão mesmo impossível recorrendo só a materiais homogéneos. Outras razões poderiam ser invocadas para esta expansão, nomeadamente a facilidade de manuseamento e, portanto, uma maior liberdade de formas para a concepção dos produtos finais.

Uma forma de classificação dos materiais compósitos é sugerida por Matthews [63], representada pelo esquema que se apresenta na figura 3.1. O mesmo permite verificar as inúmeras combinações possíveis para constituir um material compósito.

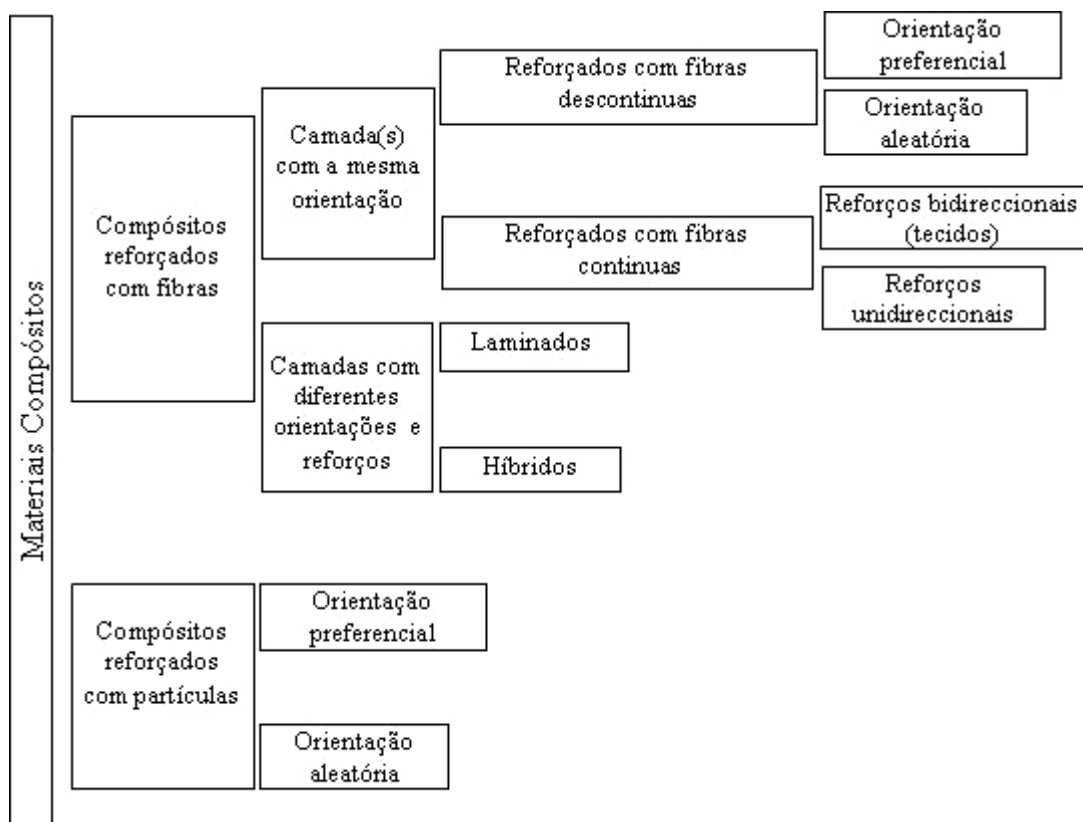


Figura 3.1 – Classificação dos materiais compósitos [63].

## 3.2 – As matrizes

Nos materiais compósitos, a resina assegura a ligação entre as fibras de reforço, e tem como função transferir as cargas mecânicas a que os materiais forem submetidos para as fibras e, além disso, protege-las do ambiente exterior. A resina deve, por sua vez, ter uma boa compatibilidade com as fibras, além de ser de baixa densidade. É possível, assim, obter sistemas em que se alia os altos desempenhos mecânicos com um baixo peso, em relação aos materiais convencionais.

Existem duas grandes famílias de resinas poliméricas, as resinas termoplásticas e as resinas termoendurecíveis. Estes dois tipos de resina têm como propriedades

fundamentais, a possibilidade de serem moldadas, ou manufacturadas de forma a tornarem-se em produtos acabados, ou então em produtos semi-acabados, cuja forma ainda pode ser modificada.

As resinas termoplásticas são, sem dúvida, em maior volume de produção, devido ao seu custo mais baixo, mas também pelo facto de poderem ser processadas várias vezes, através de sucessivos aquecimentos e arrefecimentos. Estas resinas fazem, assim, parte de um conjunto de materiais que podem ser facilmente reciclados. Com o crescente melhoramento das características destas resinas, elas têm vindo a ser cada vez mais utilizadas em detrimento das termoendurecíveis, também pelo facto de serem mais amigas do ambiente.

Em contrapartida, as resinas termoendurecíveis apenas podem ser processadas uma vez. De facto, após a polimerização pela aplicação de calor na presença de um catalizador, a resina leva a uma estrutura geométrica, que apenas pode ser destruída por aplicação de uma considerável energia térmica. Estas resinas têm melhores propriedades mecânicas e, particularmente, propriedades termomecânicas mais elevadas, do que as resinas termoplásticas. Como resultado de possuírem melhores características, as resinas termoendurecíveis são, na realidade, mais usadas no fabrico de materiais compósitos [62,63], principalmente quando as peças em produção têm aplicações de grande exigência e se espera alto desempenho na sua função. Pelo facto de uma vez “curadas” assumirem formas permanentes, este conjunto de resinas faz parte dos materiais não recicláveis.

As propriedades mecânicas da matriz têm um papel muito importante na forma e eficiência com que as fibras actuam perante solicitações de vários esforços. No conjunto fibra/matriz, é de extrema importância a qualidade da ligação fibra/matriz, ou seja, da interface. Se houver uma boa interface, as fracturas originadas pelos esforços a que o material é submetido são mais lentas, já que a propagação de fissuras ao longo do material se vai fazendo por divisões sucessivas, e mais pequenas.



### 3.3 – As fibras de reforço

Os reforços podem aumentar certas propriedades físicas aos materiais compósitos, como as propriedades térmicas, a resistência ao fogo, a resistência à abrasão e algumas propriedades eléctricas, entre muitas outras [62,63]. As propriedades que se procuram nos reforços são as elevadas características mecânicas, baixa densidade, boa compatibilidade com as resinas, facilidade de manuseamento e baixo custo, por exemplo.

No uso geral, os reforços podem provir de diversas origens, como sejam de origem vegetal, mineral, artificial ou sintética. No entanto, os materiais mais largamente usados, como reforços são na forma de fibras, de diversas configurações, formando uma fracção em volume do material compósito, variando muito em função das aplicações a que se destinam.

Em termos comerciais, elas existem nas mais diversas formas. As fibras podem ser curtas, com alguns centímetros ou mesmo fracções de milímetro de comprimento, dando origem aos feltros. Elas, também, podem ser longas, sendo cortadas no momento de fabrico do material compósito, obtendo-se telas ou peças de tecelagem com o comprimento desejado.

As fibras são constituídas por centenas de milhar de filamentos de pequeno diâmetro, na ordem de alguns micrómetros e, conseqüentemente, não podem ser usadas unitariamente. A forma mais prática de serem usadas é através da sua junção, normalmente na forma de tecidos, de esteiras e de mantas. E, ainda, podem apresentar-se em formas multidireccionais, em tecidos complexos e também já com preformação [64]. As fibras que os compõem encontram-se entrelaçadas de variadas formas. No entanto, aqueles que se encontram longitudinalmente com o tecido, são designados por teia, e os que se encontram na transversal, designam-se por trama, tal como se apresenta esquematicamente na figura 3.2.

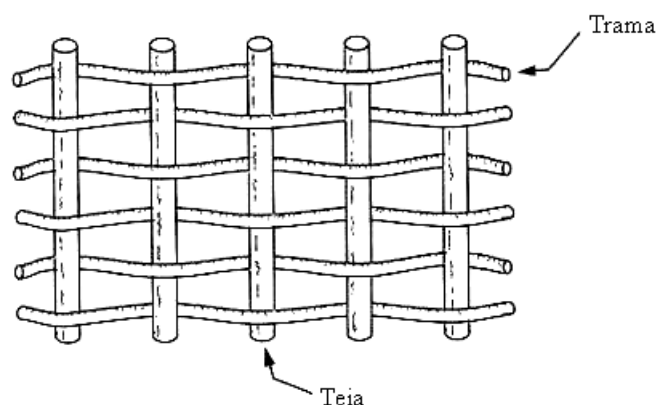


Figura 3.2 – Entrelaçamento de um tecido compósito [64].

A superfície dos tecidos é diferente de tecido para tecido, porque há diferentes densidades dos fios mas, também, devido aos diferentes tipos de entrelaçado produzido. Essas diferenças são muitas vezes aproveitadas para os identificar, através do padrão de repetição que se pode encontrar. A figura 3.3, ilustra estilos clássicos de alguns tecidos, como sejam o tafetá, o “twill” e o unidireccional.

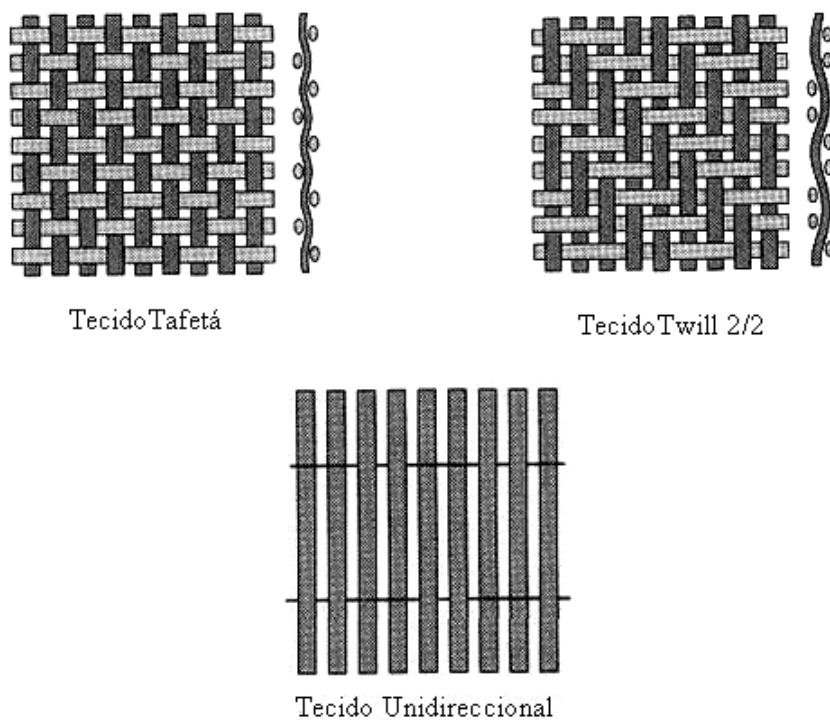


Figura 3.3 – Alguns dos estilos de entrelaçados dos tecidos [64].

Há, no entanto, entrelaçados um pouco mais complexos, mas cuja comercialização é muito limitada, dependendo das aplicações a que se destinam, também elas muito específicas. Na figura 3.4, está representado um esquema de um nó com um entrelaçado tridimensional.

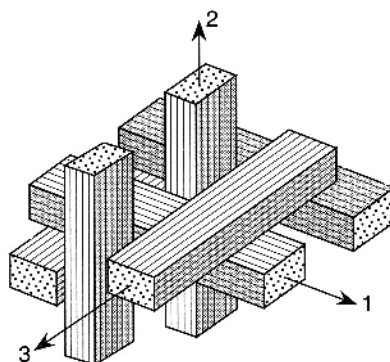


Figura 3.4 – Esquema de um entrelaçado tridimensional [64].

Hoje em dia, existem fibras, em grande número e variedade, para poderem ser usadas na elaboração dos compósitos. Desde a década de 30, que um grupo particular de fibras tem vindo a ser usado, é o caso das fibras de vidro. No entanto, apenas nos fins dos anos 50 é que surgiram as fibras com elevada rigidez (Módulo de Young), que foram desenvolvidas para aplicações estruturais, sendo denominadas fibras de alto desempenho, ou avançadas. Entre as quais, por exemplo, as fibras de boro, as fibras de carbono ou as fibras orgânicas de aramida, mais frequentemente por Kevlar<sup>®</sup>. Mais recentemente surgiram fibras de polietileno com altíssimo peso molecular, UHMWPE (*Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene*) (Spectra<sup>®</sup>) e, ainda, grandes desenvolvimentos a nível de fibras naturais.

### 3.4 – Os materiais pré-impregnados

As fibras apresentam-se secas ou pré-impregnadas. Esta última configuração facilita o seu manuseamento e aumenta a qualidade do processamento. No entanto, estes pré-impregnados têm a desvantagem de ter um tempo de armazenagem limitado e oneroso, já que têm que se manter a -18 °C.

Há dois processos de obtenção de pré-impregnados. Um é o processo de fusão a quente, em que a resina é aplicada sobre a fibra utilizando filmes de resina que são prensados nas duas faces do tecido. E o segundo processo, que é feito por revestimento com solvente envolvendo a imersão do tecido numa solução contendo 20 a 50% de solvente e resina, fazendo-se, posteriormente, a secagem do mesmo. No primeiro processo, a ausência de materiais voláteis torna o pré-impregnado menos pegajoso e, sendo mais viscoso, tem maior tempo de gel, o que faz com que a cura seja demorada e com custos mais elevados. No processo de manufatura, os desperdícios de resina são maiores, o que igualmente encarece o pré-impregnado. O segundo processo, em que o pré-impregnado é revestido por solvente, origina menos desperdícios de resina e é mais facilmente manuseável, já que a resina é menos viscosa e mais pegajosa. A percentagem de solvente retida (1-2 %) melhora o tempo de gel e acelera o processo de cura.

A transformação dos produtos semi-acabados, ou pré-impregnados, usa a mesma técnica nos processo de moldação, desde a prensa de pratos quentes ao autoclave, tal como nas fibras secas, apenas com a diferença de que a impregnação da resina no reforço já está feita, só faltando concluir o processo de consolidação. Estes produtos apresentam-se de fácil manipulação, e com a possibilidade de automatizar a produção de estruturas, pelo recurso a estes materiais. O desenvolvimento dos pré-impregnados, e compostos de vários tipos, vem associado com a possibilidade de haver uma manufatura assistida por computador, permite aumentar o número de mercados a actuar, nomeadamente na indústria automóvel e na construção naval, entre outras.

Os pré-impregnados como aplicação estrutural, frequentemente usam fibras de alto desempenho, recorrendo a várias formas de pré-impregnado, usualmente com resina termo-endurecível, cuja cura permite que os produtos obtidos possam ser mais facilmente manipulados, cortados e mesmo laminados. A cura em si consiste na aplicação de pressão e temperatura, por períodos de tempo relativamente curtos, podendo uma a duas horas ser suficiente, dependendo da resina usada.

A resina pode ser fenólica, poliéster, poliamida, etc. No entanto, a resina mais comum é a de epóxico. A percentagem por volume de fibras é elevada e na ordem dos

50% a 80%, de forma que se obtêm estruturas compósitas com elevadas performances mecânicas.

### **3.4.1 – O interesse nos pré-impregnados**

As vantagens essenciais dos pré-impregnados reside na obtenção de altos desempenhos mecânicos dos laminados, muito pelo facto das altas proporções de fibra que contêm. Este material permite melhorar as condições de manufactura, uma vez que não há necessidade de manusear a resina, nem tão pouco ser exposto aos seus vapores tóxicos, melhorando o ambiente de trabalho e o meio ambiente de uma forma geral. Devido à facilidade de manuseamento, tal como se referiu anteriormente, é também possível introduzir sistemas autónomos para manusear e manufacturar os laminados. Como resultado, obtêm-se estruturas com custos de produção, bastante mais baixos.

O processo de moldação pode ser bastante simplificado. Os pré-impregnados são arrançados, ou mesmo cortados com a forma do objecto, o que de alguma forma é já uma limitação uma vez que funciona bem só para formas simples. Uma vez cortados, as camadas são empilhadas e depois seguem uma determinada metodologia de moldação. No trabalho apresentado, usou-se a prensa de pratos quentes ou o autoclave. Quando aquecido, a resina torna-se fluida e, posteriormente, cura, seguindo o seu processo de polimerização. A pressão, a temperatura e o tempo de cura dependem do tipo e resina e da espessura do laminado pretendido.

## **3.5 – Os laminados**

Os materiais compósitos laminados, podem apresentar-se com duas ou mais camadas de diferentes materiais, solidárias entre si. A constituição de cada camada, a orientação das fibras e a forma como se organiza a sequência das camadas, permite obter um laminado mais eficiente para os fins de aplicação em vista. Podem-se produzir

laminados constituídos por camadas com fibras unidireccionais, mas também ter camadas com fibras entrelaçadas, ou mesmo, se a aplicação em vista o exigir, uma combinação de ambas.

Os laminados são obtidos por sobreposição de camadas sucessivas de reforço, impregnados com resina. A título de exemplo, veja-se um possível empilhamento para a obtenção de um laminado, figura 3.5.

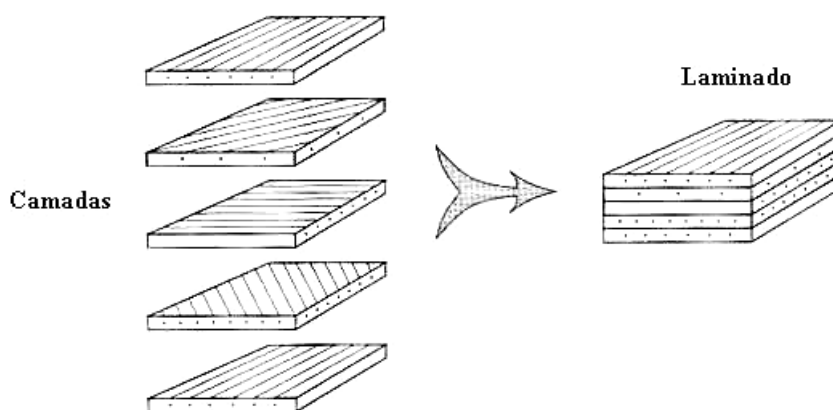


Figura 3.5 – Constituição de um laminado [64].

Os laminados com fibras ou cordões em tecidos unidireccional, são os laminados típicos base pelo que, teoricamente, todos os restantes laminados se podem reduzir a este, mesmo que para isso seja necessário restringir-se a uma área muito pequena. Cada camada é constituída por fibras paralelas, embebidas na matriz. Assim, várias camadas unidireccionais podem ser empilhadas, numa determinada sequência, com diferentes orientações das fibras, de forma a obter um laminado que tenha as propriedades mecânicas desejadas.

As características mecânicas de um material compósito, dependendo essencialmente do reforço, são, por convenção, identificadas com recurso à seguinte nomenclatura de orientação, figura 3.6:

- Cada camada é designada pelo número que indica o valor em graus entre a orientação da fibra e o eixo de referência,  $x$ .
- Camadas sucessivas são separadas pela barra, /, se os ângulos forem diferentes.

- Quando, com a mesma orientação existirem camadas sucessivas, elas são assinaladas por um número em índice.

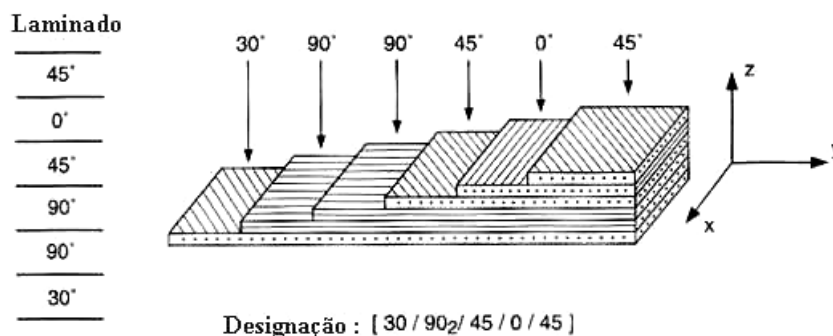


Figura 3.6 – Sequência e empilhamento de um laminado [64].

## 3.6 – Os compósitos sanduíche

A estrutura sanduíche é composta por peles e por um núcleo. As peles, de uma forma geral, são compósitos laminados. Enquanto que o núcleo é constituído por materiais diferentes. Entre eles podemos destacar a espuma, as estruturas em ninho de abelha, a madeira leve, entre outros. Sendo que a utilização destes está dependente das aplicações específicas a que o material compósito final se destina.

### 3.6.1 – A construção de um compósito sanduíche

O princípio geral de construção de uma sanduíche consiste no revestimento de um núcleo. Esse núcleo deve ser feito em material leve, ou numa estrutura com boas propriedades mecânicas sob compressão. Em ambos os lados do núcleo, aplicam-se materiais que, normalmente, são laminados, e que devem ter boas propriedades mecânicas. O principal objectivo neste processo é construir uma estrutura que combine a leveza e rigidez num só material.

Usualmente, podemos ter sanduíches com dois tipos de núcleos, um em material sólido, figura 3.7, como o aglomerado de madeira, ou as espumas, além de poderem ter outras tais como as resinas com microesferas de vidro. O outro tipo de núcleo consiste, essencialmente, em estruturas em ninhos de abelha, ou perfis de ligas de metal leve, de papel pardo grosso (Kraft®), ou de fibras de vidro, figura 3.8.

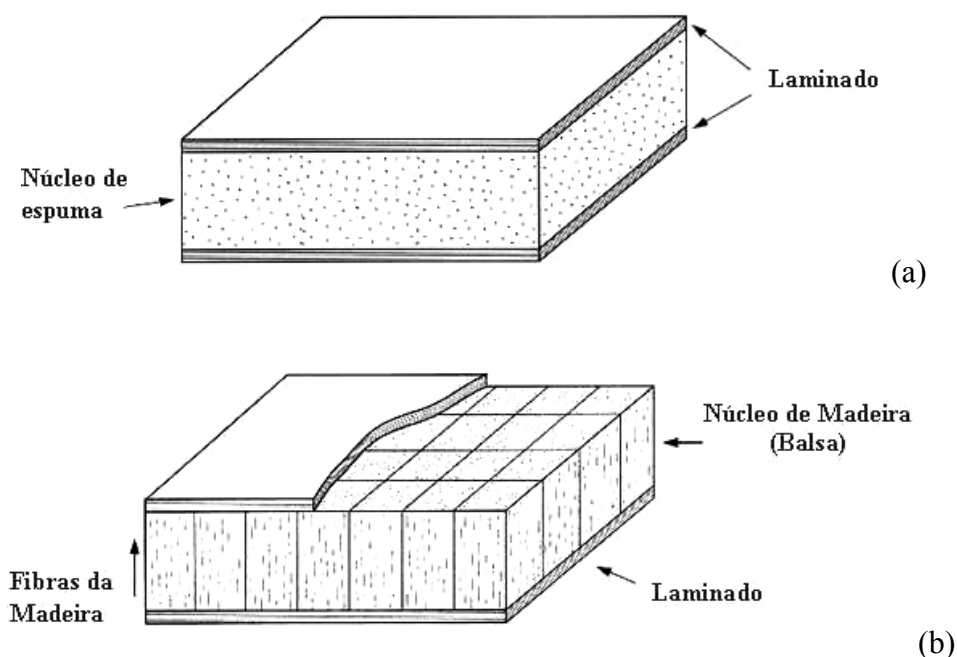


Figura 3.7 – Sanduíche com núcleo de um material sólido [64].

(a) Espuma, (b) Madeira Leve.

As peles são, frequentemente, laminados de vidro, carbono ou Kevlar®, podendo também ser de ligas leves. No sentido das construções em sanduíche cumprirem o seu papel, é necessário assegurar uma perfeita ligação entre o núcleo e as peles, para que as cargas mecânicas possam ser transmitidas entre eles. Essas ligações são, geralmente, obtidas com sistemas de resinas compatíveis com o material usado no núcleo, de forma a tornar a interface resistente ao impacto assim como impedir a delaminação.



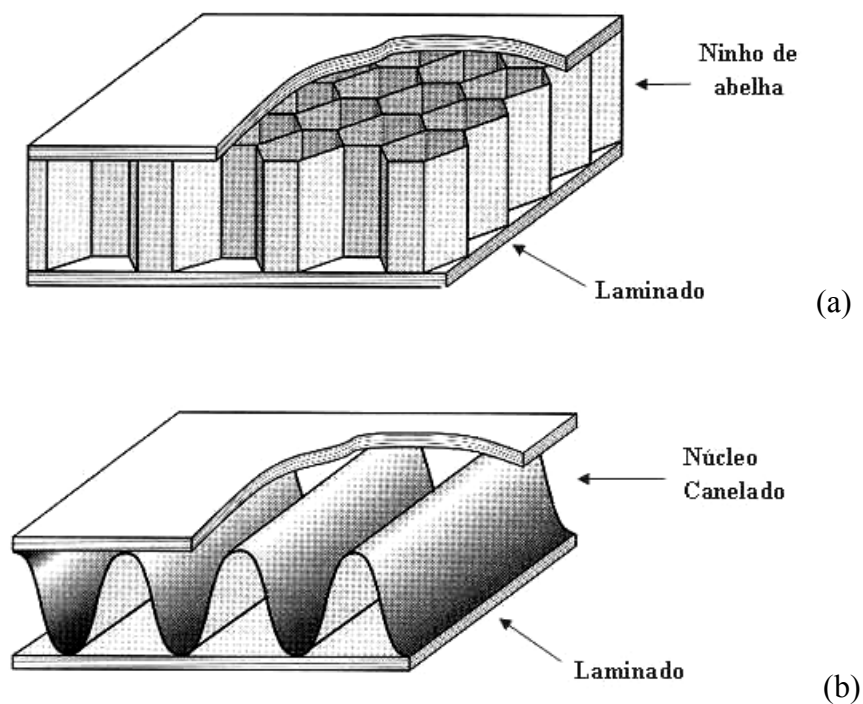


Figura 3.8 – Sanduíche com núcleos de materiais perfurados [64].

(a) Ninho de Abelha, (b) Cartão Canelado.

As utilizações mais comuns deste tipo de estrutura são em isolamento térmico e acústico, com uma alma, ou núcleo, em poliuretano, cuja aplicação também é extensiva às carroçarias dos automóveis e interiores. Em aplicações aeronáuticas, o material intermédio (núcleo) é, geralmente, uma estrutura em ninho de abelha. Na indústria naval, este é, geralmente, aplicado em madeira e/ou poliuretano. No caso dos contentores pode levar um material em contraplacado [62].

## **3.7 – Processos de fabrico de compósitos de matriz polimérica**

### **3.7.1 – Introdução**

Existem vários processos de fabrico possíveis, cada um deles com a sua especificidade que obviamente irá condicionar as peças de material compósito a obter. Vários são os factores, que podem estar na selecção dos diferentes processos, tais como os requisitos em termos de propriedades mecânicas, das dimensões, da complexidade das formas, do volume e a reprodução de peças a realizar, podendo todos eles ser decisivos na selecção do processo de fabrico.

Uma boa escolha desses processos pode propiciar significativas reduções nos custos de mão-de-obra, dado o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, o que tem permitido aumentar o nível de automatização e tornar os processos de fabrico economicamente mais competitivos. A escolha pode também ser ditada pelo acabamento pretendido para as superfícies das peças a realizar, dado que em alguns deles só uma das faces apresenta um bom acabamento. No entanto, há uma grande vantagem, que é o facto de se realizarem peças de grandes dimensões e com geometrias complexas. Em algumas técnicas, por se usarem moldes fechados, ambas as superfícies de acabamento são boas, além da particularidade de haver também uma enorme redução das emissões de produtos voláteis, que são nocivos para a saúde, sendo a complexidade e tamanho das peças mais limitado. As constantes limitações de emissão destes poluentes para a atmosfera tem estimulado os investigadores e fabricantes para o desenvolvimento de novos materiais e métodos de fabrico

A produção de placas sensoras para este trabalho teve como base os processos a seguir descritos de forma sumária. No entanto, outros mais haveria a mencionar [64].

### 3.7.2 – Moldação manual

A moldação manual é o método mais económico e o mais comum usado na manufactura de estruturas compósitas. As fibras são impregnadas pelas resinas por processo manual. A impregnação é efectuada através de pincéis ou rolos que forçam o embebimento das fibras. Este método requer pouco equipamento e, consequentemente, o investimento também é menor. Estas vantagens estão na origem do sucesso da fibra de vidro na indústria dos compósitos. A moldação manual pode ser usada na fabricação de estruturas, tanto de grandes como de pequenas dimensões, como por exemplo em carcaças de automóveis, nomeadamente em réplicas de modelos clássicos, em pequenas embarcações de recreio, painéis de edifícios, pás de turbinas, assim como em reparações e reforços. A proporção de fibras obtida por este método é bastante baixa, podendo variar usualmente entre os 25% e os 35% de peso do reforço. As resinas utilizadas por este tipo de técnica são, essencialmente, de poliéster não saturado, podendo também ser usadas resinas de epóxico, viniléster e fenólicas. As fibras empregues podem estar na forma de mantas, tecidos ou unidireccionais.

Nesta técnica de moldação, o reforço é colocado sobre o molde e impregnado por resina. Várias camadas deste conjunto podem ser aplicadas por esta metodologia, dando origem a um laminado com a espessura desejada. Em algumas situações, pode-se tornar vantajoso permitir que a camada anterior esteja no estado de gel antes do laminado continuar. A cura da resina é, geralmente, efectuada à temperatura ambiente, podendo também ser feita numa estufa para acelerar o processo. Do mesmo modo, é necessário aplicar uma pós-cura, para garantir a estabilidade da peça. Essa pode ser feita à atmosfera ambiente, por alguns dias ou mesmos semanas. Esta pós-cura pode ser acelerada, aquecendo a estrutura por um período de tempo de 5 a 10 horas, a aproximadamente 80 °C, por exemplo. A remoção do molde é levada a cabo após completar a cura e pós-cura, dependendo do tipo de resina e da temperatura de trabalho, utilizando-se muitas vezes, tempos na ordem das 8 a 10 horas, por peça.

As peças obtidas por moldação manual apresentam geralmente superfícies de baixa rugosidade, dependendo da superfície do molde, sendo este normalmente de custos reduzidos. É uma técnica de fácil aprendizagem. A qualidade do laminado assim obtido depende, em larga medida, da habilidade e cuidado do operador. Este terá de ter

cuidados acrescidos na mistura da resina com o catalizador/acelarador para as resinas de poliéster e de um endurecedor apropriado para a resina de epóxido. As considerações de segurança e manuseamento das resinas são também fundamentais devido à elevada percentagem de estireno libertado para o meio ambiente resultante das resinas de poliéster e viniléster.

### **3.7.3 – Moldação manual assistida por vácuo**

Esta técnica de produção é, genericamente, igual à anterior, daí que todas as situações a ter em conta na anterior repetem-se nesta. A diferença está, concretamente, na significativa melhoria da compactação, obtida pela aplicação de um saco de vácuo. O processo de moldação com recurso a um saco de vácuo é o indicado para produções limitadas, mas principalmente para a manufatura de estruturas com um elevado grau de complexidade. Com este processo, conseguem-se obter boas propriedades mecânicas, principalmente devidas à distribuição uniforme de resina pelo reforço. A pressão de vácuo é realizada em molde fechado por uma membrana, sendo o ar retirado através de uma bomba de vácuo. O vácuo vai auxiliar a impregnação e diminuir as bolhas de ar. O principal defeito desta técnica tem a ver com a baixa velocidade de produção.

### **3.7.4 – Moldação em autoclave**

No caso da moldação em autoclave, o empilhamento do material compósito terá de ser feito à temperatura ambiente ou, então, em ambiente controlado. A utilização desta técnica de produção envolve a aplicação de um saco de vácuo à volta do empilhamento. Dada a similaridade dos processos envolvidos esta técnica pode, por conseguinte, ser considerada uma extensão da técnica de moldação manual. Uma vez realizado o saco de vácuo, e verificado o seu correcto funcionamento, quanto a possíveis fugas, todo o conjunto é inserido num autoclave, o qual consiste numa câmara que permite controlar a pressão, o vácuo e a temperatura, permitindo também uma cura em pressão e temperatura controladas. A pressão de vácuo é efectuada em molde fechado através de uma membrana, sendo o ar retirado por uma bomba de vácuo que o

extrai, para o exterior, figura 3.9. O processo auxilia a impregnação, fazendo com que haja uma diminuição das bolhas de ar. As resinas empregues são, geralmente, de epóxico e fenólicas, e resinas de alta temperatura tais como poliamidas e bismaleimidas, dado que as resinas de poliéster e viniléster podem causar problemas devido à emissão de estireno que pode danificar a bomba de vácuo.

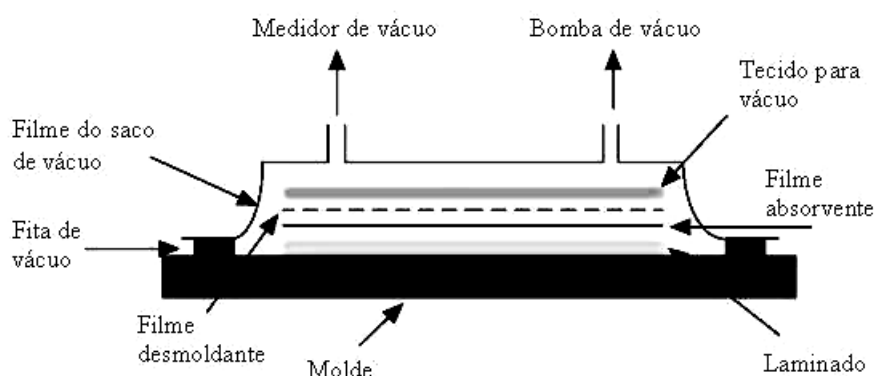


Figura 3.9 – Esquema de montagem na produção por autoclave em saco de vácuo [65].

Componentes usados num saco de vácuo.

Este processo de moldação em saco de vácuo, tal como o anterior, é indicado para produções limitadas mas, também ele, principalmente para estruturas com um alto grau de complexidade. Conseguem-se obter boas propriedades mecânicas, dada a distribuição uniforme de resina pelo reforço. A produção com recurso a esta técnica é baixa. No entanto, a produção de materiais compósitos por autoclave é quase exclusivamente aplicada aos pré-impregnados. Os laminados realizados por esta técnica de produção podem ser formados por várias camadas de pré-impregnado dispostos sobre o molde. Dado que o autoclave tem temperatura, pressão e vácuo controlados, a cura é realizada a altas temperaturas geralmente entre 120-180 °C, embora estes parâmetros dependam, obviamente, do tipo de resina empregue. As grandes vantagens no uso deste processo prendem-se muito com os pré-impregnados. As percentagens de resina obtidas nas peças realizadas são estabelecidas com exactidão pelo fabricante.

Devido ao longo tempo de trabalho que estes materiais permitem, é possível executar laminados complexos e morosos. Os materiais conferem boas condições de

higiene e segurança sendo o trabalho mais limpo. A química da resina pode ser otimizada para o melhor desempenho mecânico e térmico do componente.

O processo pode facilmente ser automatizado. Componentes estruturais isentos de porosidades e com excelente consolidação apresentam também uma maior percentagem de reforço, possibilitando a obtenção de um material com maior performance. No entanto, existe uma série de desvantagens que também se devem ter em conta, tais como, custos de produção elevados devido aos longos tempos de cura, o material do molde deve suportar as temperaturas e pressões do ciclo de cura, a dimensão dos componentes a realizar é também limitada pelas dimensões do autoclave. Por isso, as peças fabricadas por autoclave são, geralmente, vocacionadas para aplicações específicas, nomeadamente para a aeronáutica (asas e secções traseiras, assim como estabilizadores verticais) ou na alta competição automóvel, como sejam alguns dos componentes de carros de Formula 1. Aparecem hoje em dia, cada vez com mais frequência, em quase todos os desportos motorizados ou não de alta competição.

### **3.7.5 – Moldação por prensa de pratos quentes**

Este processo de moldação é um dos mais económicos, para um elevado volume de produção de estruturas de alta performance de pequena e médio tamanho. A moldação é obtida através de uma prensa hidráulica, com pratos aquecidos. O tempo que decorre entre o fecho e abertura dos pratos depende, das especificidades do material em uso, do tempo de polimerização da resina, e também da própria espessura da estrutura.

O processo em si permite salientar as propriedades mais significativas de material reforçante e, conseqüentemente, as estruturas obtidas por este processo apresentam-se com boas propriedades mecânicas. As pressões usadas podem variar entre os 0,5 e os 15 MPa, dependendo das dimensões da estrutura a ser obtida. As temperaturas do molde na realização, podem variar numa gama que vai dos 80 °C aos 170 °C, com temperaturas entre os 100 °C e os 130 °C no caso da resina de poliéster não saturada.

Com este processo são frequentemente usados os pré-impregnados. O material assim obtido apresenta uma boa compactação e uma baixa percentagem de porosidade. As resinas a usar podem ser todas as disponíveis e referidas anteriormente. A grande desvantagem neste processo, prende-se com o possível esmagamento que as fibras podem sofrer devido a uma pressão que por vezes pode ser excessiva, nomeadamente em determinadas aplicações quando se incorporam outras fibras muito mais sensíveis, nos laminados.

### **3.7.6 – Moldação por RTM (ou VARTM)**

Os processos de moldação por transferência de resina, RTM, ou os processos de moldação por transferência de resina assistida por vácuo, VARTM, permitem obter laminados com elevada fracção volúmica de fibra e baixa taxa de vazios. Os reforços utilizados apresentam-se na forma de tecidos secos, e empilhados sobre o molde. Todo o tipo de fibras com diferentes orientações pode ser usado por esta técnica de produção. As resinas usadas são geralmente de poliéster não saturada, de epóxico, viniléster e fenólica. As bismaleimidas podem ser utilizadas, mas a cura é efectuada a alta temperatura.

Este processo consiste na utilização de um molde fechado no qual é injectada a resina sobre pressão, podendo o processo ser assistido por vácuo. As peças assim obtidas apresentam, as duas faces lisas e é possível colocar furos para insertos, logo na produção. Com o molde fechado, a resina é injectada para dentro da cavidade do molde, impregnando o reforço e curando. O processo assistido por vácuo melhora a impregnação do reforço, aumentando os teores de fibra até 70%, e reduzindo a formação de porosidades. É possível usar, no processo, sistemas de sensores para monitorização e controlo do enchimento e fluxo da resina. Depois da injeção, os canais de entrada de resina são fechados. A cura pode, então, efectuar-se à temperatura ambiente ou alta temperatura, mas neste caso o molde deve ser aquecido.

Este modo de produção permite obter, um ambiente de trabalho mais limpo devido à redução de emissões, uma vez que este ocorre num processo de molde fechado.

Para altas pressões, o molde deve ser metálico tornando-se pesado e de custo mais elevado. Pelo facto do molde ser metálico, não é possível visualizar o enchimento, o que torna o processo mais complexo e propício ao aparecimento de peças com algumas imperfeições, como zonas que possam não estar perfeitamente impregnadas com resina. Este processo de moldação é, geralmente, limitado a componentes de médias dimensões, permite uma redução dos custos de mão-de-obra, dada a possibilidade da reutilização dos moldes. As aplicações deste processo surgem em diversas áreas, como sejam a indústria automóvel e a aeronáutica, por exemplo, sendo que este processo está associado à produção de estruturas com formas de grandes dimensões.

### 3.8 – Propriedades mecânicas dos compósitos

A apresentação dos materiais compósitos depende muito do objectivo final a que o material se destina, e daí a grande diferenciação nas propriedades que existem de material para material, apesar de parecerem semelhantes. As propriedades de maior relevo para a caracterização do comportamento mecânico dos materiais, são o módulo de Young, ou módulo elástico, e a tensão de rotura [66].

As propriedades de alguns dos materiais utilizados no fabrico de materiais compósitos são apresentadas, a título de exemplo, nas tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais usados como matriz [62,64].

|  | Matriz            |           |          |                |               |               |
|--|-------------------|-----------|----------|----------------|---------------|---------------|
|  | Termoendurecíveis |           |          | Termoplásticos |               |               |
|  | Epóxido           | Poliéster | Fenólica | Poliamida      | Policarbonato | Polipropileno |
| Módulo de Young (GPa)                        | 2,1-6,0           | 1,3-4,5   | 4,4      | 1,4-2,8        | 2,2-2,4       | 1,4-1,9       |
| Resistência tracção (MPa)                    | 35-90             | 45-85     | 50-60    | 60-70          | 45-70         | 25-38         |
| Densidade $\times 10^3$ (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1,1-1,4           | 1,1-1,5   | 1,3      | 1,1            | 1,1-1,2       | 0,9           |
| Temperatura de transição vítrea, Tg (°C)     | 120-190           | -         | -        | 70             | 150           | -             |



Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais usados como reforço [62,64].

| Fibras de reforço sintéticas                 |                   |                   |                      |                             |                        |      |             |
|--|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|------|-------------|
|  | Vidro<br><i>E</i> | Vidro<br><i>R</i> | Aramida<br>(Kevlar®) | Carbono Alta<br>Resistência | Carbono<br>Alto Módulo | Boro | Polietileno |
| Módulo de Young (GPa)                        | 70                | 85                | 130                  | 240                         | 390                    | 420  | 172         |
| Resistência tração (GPa)                     | 3,5               | 4,6               | 2,8                  | 2,5                         | 2,1                    | 3,5  | 2,96        |
| Densidade $\times 10^3$ (Kg/m <sup>3</sup> ) | 2,54              | 2,48              | 1,5                  | 1,9                         | 1,9                    | 2,65 | 0,97        |

De uma forma qualitativa, pode-se ver no gráfico da figura 3.10, a resistência obtida pelo material compósito, em função da orientação que as fibras têm quando da junção destes materiais [65]. Pode-se observar, pela figura 3.10, que os materiais constituídos com reforços que sejam fundamentalmente unidireccionais, apresentam uma resistência superior, principalmente na direcção dominante das fibras, em relação àqueles em que o reforço é constituído por segmentos de fibra, ou tenham várias direcções, sem que qualquer uma delas seja dominante.

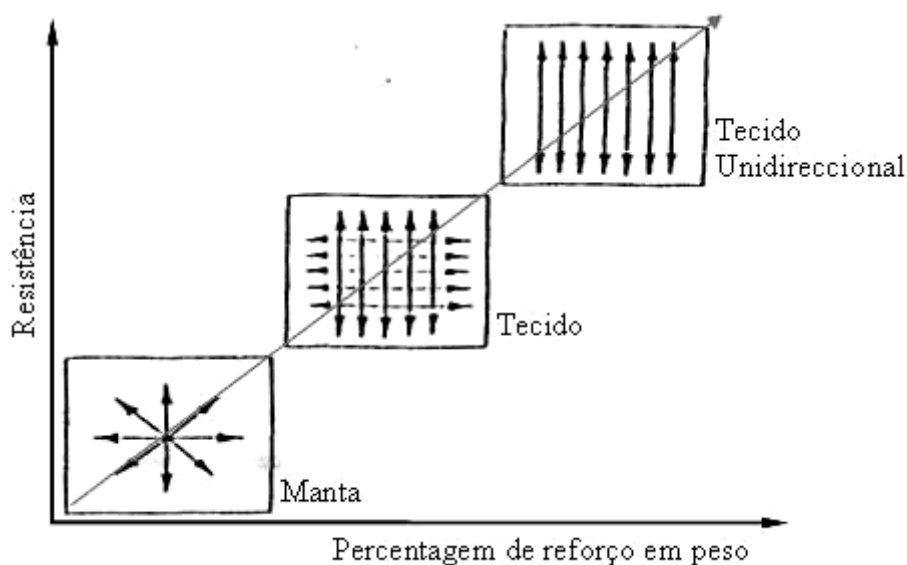


Figura 3.10 – Resistência dos materiais compósitos em função da percentagem de reforço em peso.

Ainda, em termos qualitativos, podemos também ver no gráfico da figura 3.11, uma das relações tensão versus deformação para a fibra, a matriz e o material compósito [65]. Embora nem sempre seja assim, com o compósito e a fibra a inverterem a posição.

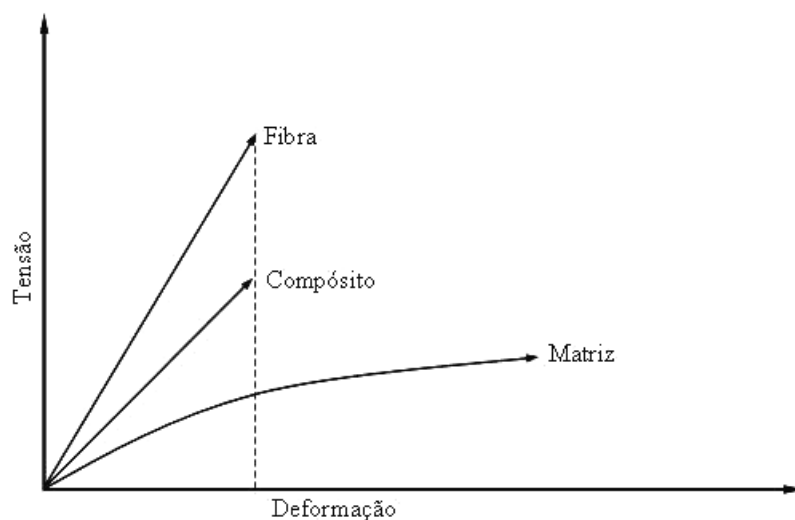


Figura 3.11 – Relação entre os constituintes e o produto final, em termos de tensão em função da deformação [65].

De uma forma geral, os materiais poliméricos exibem um comportamento designado por viscoelástico. Esse comportamento pode ser observado na figura 3.12, em que é aplicada uma carga constante até  $t_1$ , a partir do qual se dá uma descarga completa.

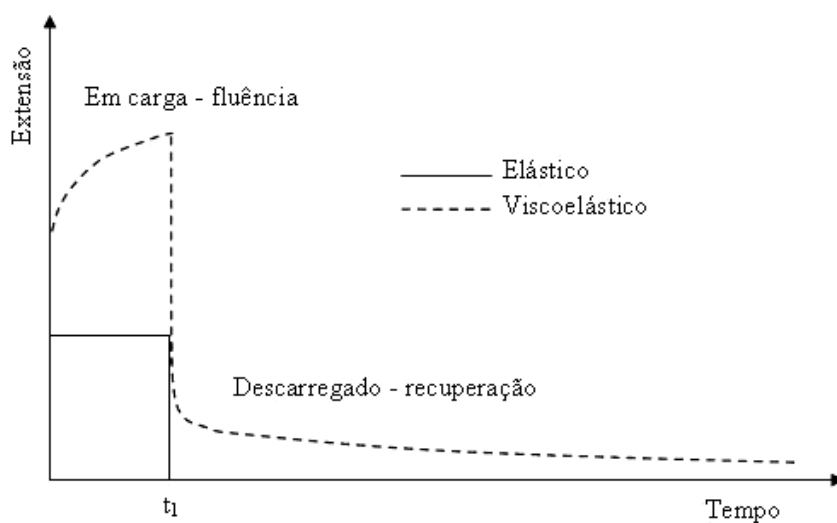


Figura 3.12 – Resposta dos materiais elástico e viscoelástico [67].

O comportamento dos materiais elásticos é independente do tempo. No entanto, nos materiais viscoelásticos, a história passada influencia o comportamento futuro do material. Desta forma, os materiais poliméricos exibem um comportamento dependente do tempo. Esse comportamento manifesta-se através de ensaios de fluência, para os quais uma tensão é imposta a um nível constante. No caso dos materiais viscoelásticos, um aumento lento e progressivo da extensão é, então, observado apesar da força manter-se constante. Esse comportamento está representado na figura 3.13. A medida da fluência é então dada pela razão entre deformação em função do tempo e a tensão aplicada.

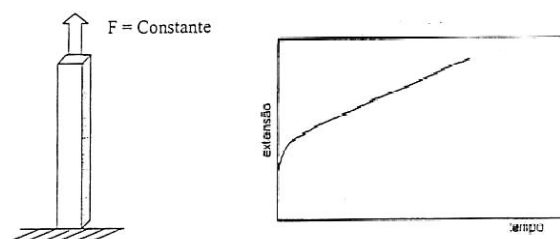


Figura 3.13 – Ensaio de fluência, com o comportamento da extensão em função do tempo para os materiais compósitos em fluência [67].

O mesmo comportamento viscoelástico pode também manifestar-se através do ensaio de relaxação no qual uma extensão constante é imposta. Para uma deformação dada, observa-se um decréscimo progressivo da tensão aplicada, figura 3.14. O módulo de relaxação é obtido através da tensão em função do tempo e da deformação imposta.

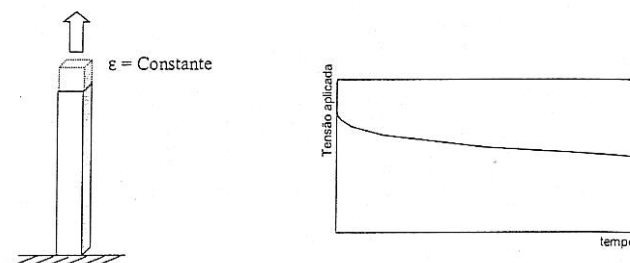


Figura 3.14 – Ensaio de relaxação de tensões, com a tensão aplicada em função do tempo para os materiais compósitos em relaxação [67].

## 3.9 – Algumas aplicações dos materiais compósitos

Neste ponto são apresentadas algumas das aplicações dos materiais compósitos [11,62], algumas delas verificadas nos últimos tempos, fruto do melhor conhecimento das potencialidades desses materiais, que cada vez mais se tornam usuais, na nossa vida quotidiana, desde o aro da porta de casa, ao revestimento das paredes exteriores até às pontes que atravessamos diariamente quando nos deslocamos para o trabalho, em todas estas e muitas outras podemos encontrar, hoje em dia, os materiais compósitos. Tal é o resultado, também, da crescente inovação tecnológica, que nos permite obter mais e melhores materiais, a custos comportáveis para o vulgar utilizador.

Nos parágrafos seguintes, será apresentado um conjunto de exemplos, que no momento foram considerados, de algumas das aplicações em materiais compósitos. Devido à sua maior facilidade de execução, estes materiais e/ou aplicações são mesmo motivadores, no sentido de, tentar implementar sistemas de monitorização, que possam acompanhar todo o processo de elaboração/produção de peças ou estruturas, até à sua “vigilância” em tempo real, quando da sua entrada em pleno funcionamento, podendo estas, atingir um maior tempo de vida útil.

### 3.9.1 – Indústria aeroespacial

A selecção de materiais na indústria aeroespacial em particular é muito importante. Existem várias restrições impostas a estes veículos, aeronaves, tais como o peso, a duração e a estabilidade térmica. O peso é determinante para o custo de lançamento do satélite, uma vez em órbita deve-se manter em serviço durante 10 a 30 anos, o que obriga a duplicar ou triplicar os sistemas alternativos. Quando em órbita, o satélite é submetido a elevados gradientes de temperatura, muito elevadas na face que se encontra exposta ao sol e, em contra partida, temperaturas muito baixas na face à sombra, para além da radiação que afecta os materiais [68]. Da mesma forma que algumas antenas incorporadas em estações espaciais e satélites, quando expostas directamente aos raios solares, necessitam de manter a sua estabilidade dimensional, no

sentido de se manterem em correcto funcionamento, no envio do sinal para a base. Assim, o grau de exigência, em termos comportamentais, dos materiais em condições ambientais mais extremas, é muito elevado. Tal como é o caso dos vaivém espaciais, reservatórios do combustível, os escudos de protecção para a reentrância na atmosfera terrestre das aeronaves espaciais, por exemplo. Na figura 3.15, é possível ver duas das aplicações mais exigentes, em que são aplicados materiais compósitos. As suas especificidades resultam num tipo de produção em pequena escala, em que os custos de produção podem ser elevados, podendo no entanto ser compensados pelos menores custos operacionais [68].



(a)



(b)

Figura 3.15 – (a) Estação orbital. (b) Vaivém espacial no momento de decolagem [68].

### 3.9.2 - Engenharia civil

O uso destes materiais começou também a generalizar-se na construção civil, com aplicações, nos revestimentos exteriores dos edifícios, na realização de painéis de fachada e reforços para betão (perfis pultrudidos) [69]. Por outro lado, existem aplicações mais convencionais, com sejam, em piscinas, portas e mobiliário, nomeadamente o sanitário [69,70].

A sua utilização surge também na construção de pontes pedonais, muitas delas em zonas de laser, e em que impacto ambiental é menor, e menos agressivo, mas também, e mais recentemente, na construção de pontes de grande envergadura para circulação

automóvel, como mostra a figura 3.16, uma componente de uma auto-estrada, construída em Inglaterra, tratando-se da primeira ponte do género na Europa [71]. Uma outra empresa na Dinamarca construiu uma ponte em material compósito, neste caso em perfil pultrudido [72]. A empresa reclama que esta tem a mesma capacidade de carga que uma ponte convencional, quer fossem em metal ou em betão.



Figura 3.16 – Componente de uma auto-estrada, em Inglaterra [71].

Cada vez mais é evidente que as propriedades mecânicas destes materiais concorrem com os materiais tradicionais de utilização estrutural, situação que se verifica no reforço de colunas de pontes em regiões sismicamente activas, como na Califórnia e no Japão [73].

### 3.9.3 – Energia eólica e estruturas marítimas

Nas aplicações da área da energia eólica, com a crescente utilização dos aerogeradores para a produção de energia, a produção destes tem aumentado significativamente, assim como a utilização de uma maior diversidade de materiais compósitos. Deixou de ser só nas pás, para passar a ser também em muitos casos, nas próprias torres. Situação que também ocorre nas estruturas off-shore, em que há um aumento significativo da percentagem deste tipo de material que é utilizado [68]. Na figura 3.17, mostram-se duas estruturas deste tipo.

Algumas das empresas reclamam a construção das maiores pás para aerogeradores, com 61,5 metros de comprimento, como é o caso da “L M Glasfiber”. Há também outras grandes empresas empenhadas na construção de grandes aerogeradores [74-76]. No entanto, dadas as necessidades mundiais de se conseguirem energias alternativas, para além do petróleo, cada vez mais empresas fabricam componentes para os aerogeradores, uma vez que se trata de uma energia limpa e amiga do ambiente.



(a)



(b)

Figura 3.17 – (a) Aerogerador [65]. (b) Estrutura marítima [68].

### 3.9.4 – Transportes aéreo, terrestre e marítimo

Estes materiais são também utilizados na construção de planadores [77], de aviões de turismo, de aviões militares, assim como centenas de peças para aviões de grande porte (asas, estabilizadores verticais, e discos de travagem para aviões e elementos de transmissão, por exemplo [78]). Estão, também, a ser utilizados na construção de hélices, todas em compósito, para o motor principal dos helicópteros, e com isso vão permitir que os mesmos consigam levantar uma carga adicional de 900 Kg e voar mais rápidos [79]. Os fabricantes esperam, também, que as mesmas tenham um tempo de vida duas vezes superior às das hélices em metal. O avião comercial da Airbus, o A340 [80], possui já uma quantidade substancial de material compósito, em toda a superfície envolvente do avião, e mesmo em algumas aplicações estruturais. Na figura 3.18, todas as partes a sombreado são em material compósito. Num outro avião, o A380 [78,80], o

maior avião comercial do mundo, que já voa nos céus de França, inclui 30 toneladas de material compósito, o que é cerca de 22% do material utilizado.

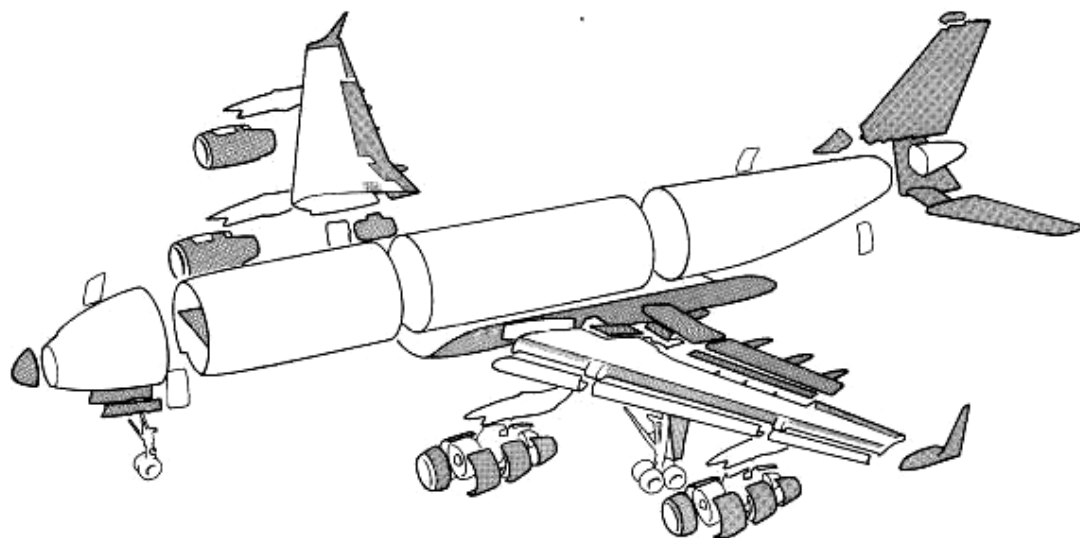


Figura 3.18 – O avião comercial A340 da Airbus [80].

Nos transportes terrestres, mais recentemente, empresas inglesas e alemãs têm estado empenhadas em desenvolver um produto que seja economicamente viável para a construção de um carro, todo ele em material compósito, desde o chassi aos painéis exteriores [81]. O material compósito empregue deverá ser reciclável, o que é uma mais valia, nos dias de hoje, dadas as restrições ambientais. No entanto, existem inúmeros exemplos de automóveis do nosso quotidiano que incorporam materiais deste tipo, desde as caixas de fusíveis, para o alojamento das componentes eléctricas [82], e a cobertura das caixas de carga de alguns veículos [83]. Em elementos mais estruturais, como sejam as zonas frontais, elemento que suporta o radiador e a grelha dianteira fazendo a ligação dos pilares frontais [69,84], e também em carroçarias completas para os automóveis, elementos de suspensão, da transmissão, depósitos para o combustível, em cisternas para camiões além de caravanas e autocaravanas [69]. Mais recentemente, pode-se ver a introdução dos materiais compósitos em diversos componentes estruturais, caso do Aston Martin V12 Vanquish [85], e nos comboios de alta



velocidade, com a construção dos narizes, dos vagões, dos bancos e painéis interiores [86].

No transporte marítimo podem-se ver aplicações em hovercrafts [86], embarcações de salvamento [87] e barcos de acção rápida para as forças militares, figura 3.19 [88], e em inúmeras aplicações de barcos de recreio [69].



Figura 3.19 – Embarcação militar.

### 3.9.5 – Desporto

Com os avanços da engenharia, estes materiais são cada vez mais usados no desporto de alta competição e também, por arrasto, em áreas das actividades de laser, muito embora, nestas últimas é, em grande parte, devido às acções de marketing, em que o objectivo será proporcionar aos praticantes de uma determinada modalidade desempenhos de elevado nível, fazendo-os sentir como se estivessem em alta competição. Os exemplos destas aplicações são, hoje em dia, muito diversificadas, entre as quais podem-se referir;

- Os desportos motorizados, como sejam os carros de Fórmula 1.
- O ciclismo, com bicicletas estilizadas, em função da modalidade a que se destinam, e podendo ser adaptadas às exigências de cada atleta.
- Os desportos de água, com a produção de pranchas de windsurf, de surf, de canoas e caiaques, e cada vez mais em embarcações de competição, quer de velocidade, caso dos Fórmula 1 de água, assim como em grandes veleiros e catamarans, usados nas travessias dos oceanos e voltas ao mundo.

- Os desportos de neve, com os esquis a serem feitos com materiais da última geração, os quais incluem dispositivos para amortecer as vibrações, e assim permitirem um maior controlo e maneabilidade, mas também em pranchas de snowboard, com a mesma tecnologia a ser empregue.
- O ténis, com as raquetes, que são cada vez mais leves e eficazes, ao conseguirem imprimir uma maior velocidade à bola e também permitirem direccionar melhor a mesma.
- O hóquei, com a utilização destes materiais na produção de equipamento de protecção dos jogadores, assim como dos bastões, os quais estão cada vez mais sofisticados ao ponto de imprimirem maiores velocidades às bolas e discos.
- E o golfe, com a realização de tacos, para a obtenção de melhores performances em termos de direcção da bola.

### 3.9.6 – Medicina

Devido às vantagens de alguns destes materiais como a bio-compatibilidade, eles são usados em próteses, dada a durabilidade e a possibilidade de produzir modelos com uma rigidez próxima do modelo natural [89], tal como se pode ver pela figura 3.20, em próteses de membros inferiores feitas em material compósito.

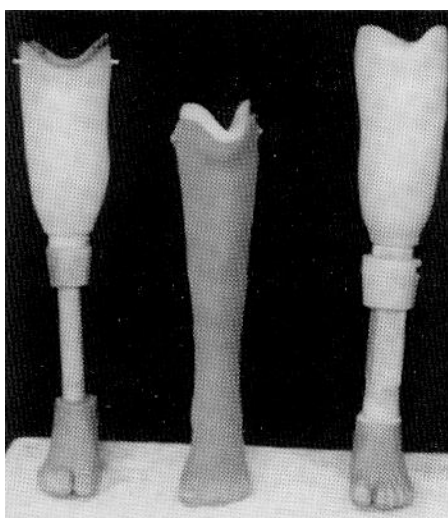


Figura 3.20 – Próteses em material compósito [89].

### **3.10 – Algumas das vantagens e desvantagens destes materiais**

O recurso aos materiais compósitos deve-se às suas propriedades mais atractivas, como são a elevada resistência específica e ao elevado módulo de elasticidade específico, garantindo estruturas extremamente rígidas e leves, o que potencialmente significa grande poupança de peso. Estas propriedades aliadas à sua excelente resistência à fadiga, fácil formabilidade, resistência à corrosão, baixo coeficiente de expansão térmica e boas características de amortecimento, torna os materiais compósitos ideais para operarem em ambientes com condições severas.

Devido à sua heterogeneidade, as propriedades estruturais dos compósitos laminados podem também ser ajustadas aos requisitos dos projectos, pela escolha do material da matriz, do material das fibras de reforço, da orientação das fibras de reforço e da sua fracção volúmica em cada camada, do número de camadas e da sequência do seu empilhamento, a possibilidade de seleccionar um revestimento, permitindo desta forma fazer um melhor enquadramento ao ambiente envolvente, à medida da aplicação pretendida.

As múltiplas possibilidades da elaboração de projectos com a incorporação destes materiais, acompanhando a exigência requerida nas aplicações tecnologicamente mais evoluídas, e pela celeridade cada vez mais premente na obtenção de resultados, leva a uma necessidade crescente de conhecer cada vez melhor o comportamento das novas estruturas obtidas, e perceber o seu correcto funcionamento físico e mecânico. Neste campo, as estruturas obtidas com estes materiais permitem, pela facilidade de embebimento de sensores, monitorizar em tempo real, desde o momento de produção, e durante todo o tempo de vida útil do material ou estrutura.

Na utilização dos materiais compósitos podem-se apontar como desvantagens, o seu custo (materiais e mão-de-obra especializada), mas também, problemas com a sua reciclagem. Constata-se ainda, que a maioria das falhas destes materiais são principalmente devidas a delaminagens nas interfaces entre camadas de diferentes

orientações. Muitas das estruturas projectadas, são construídas por placas e laminados compósitos de baixa espessura ou painéis, dado que são cada vez mais finos, originam problemas de vibração, devido à sua grande flexibilidade. Como é o caso dos painéis exteriores dos automóveis e autocarros. Assim, aquilo que é uma mais valia dos materiais, pode tornar-se também numa desvantagem.

# Capítulo 4

## 4 – Sensores em fibras ópticas

### 4.1 – Introdução

No passado não se utilizava a luz para a comunicação, embora a ideia do seu uso para esse fim não fosse completamente nova. As primeiras comunicações foram realizadas pela transmissão de luz através do ar, mas essa ideia viria a fracassar devido às perturbações atmosféricas, os elementos naturais, como sejam as chuvas ou o nevoeiro, afectavam negativamente os raios luminosos que se pretendiam transmitir. Assim, além do inconveniente dos elementos atmosféricos, havia também o inconveniente de o emissor e o receptor, teriam de estar bem visíveis entre si. Muito mais tarde, nos anos sessenta, a realização de guias de onda ópticos com baixas perdas, e nos anos setenta, o desenvolvimento de fibras ópticas de alta qualidade vieram revolucionar a área das comunicações. Esta tecnologia rapidamente foi absorvida pela área de investigação de sensores, estimulando o mercado da fibra óptica e em particular a área das telecomunicações [90,91].

No início da década de oitenta, a quantidade de componentes de fibras ópticas disponíveis no mercado era escassa apresentando, consequentemente, um preço elevado. Esta situação limitava os sensores de fibra óptica a serem apenas usados em pequenos

sectores de mercado onde as suas vantagens se impunham. Como exemplo, estes sensores eram usados para medição de temperatura em ambientes electricamente hostis [92]. Na década de noventa, o número de componentes em fibras ópticas cresceu enormemente, o correspondente custo foi diminuindo e a sua qualidade e desempenho foi aumentando substancialmente. Nesta década, novos acessórios, tais como os acopladores de fibra óptica, os componentes de multiplexagem em comprimento de onda e os dispositivos ópticos integrados tornaram-se comercialmente disponíveis.

Nesta altura, os díodos laser sofreram um crescimento assinalável, com o seu tempo de vida a passar de algumas horas para as dezenas de milhar de horas. Por outro lado, a fibra óptica monomodo apresentava menor atenuação, maior concentricidade do núcleo e da bainha, e melhor material de revestimento [93].

Este crescimento permitiu o aparecimento de mais sensores em fibra óptica, e a sua entrada em sectores do mercado tais como os de rotação por inércia, monitorização de produção e sistemas de energia e controlo de processos [94]. Hoje em dia, um maior número de componentes está disponível a um preço ainda menor. O resultado tem sido a proliferação dos sensores em fibra óptica, quer para uso em sistemas de controlo industrial, quer na área de estruturas inteligentes. O desenvolvimento e a subsequente produção em massa de componentes que suportam estas indústrias, acompanhado de uma queda de preços, e do aumento da qualidade associada às fibras ópticas, tem feito dos sensores em fibra óptica um substituto natural de muitos dos tradicionais sensores de base eléctrica para a medição de deslocamento, rotação, temperatura, pressão, medição de campos eléctricos e magnéticos, etc.

De entre os sensores em fibra óptica mais utilizados nos últimos anos encontram-se aqueles que são baseados nas propriedades das redes de Bragg em fibra óptica. São, de facto, este tipo de sensores, os utilizados no processo de embebimento nos materiais compósitos, realizados neste trabalho. As técnicas de produção permitem, hoje em dia, que as redes de Bragg em fibra óptica possam ser utilizadas para além dos sensores, como filtros espectrais, espelhos de realimentação de lasers com uma largura espectral estreita, assim como em dispositivos multiplexados em comprimento de onda, entre outros [95-97].

A figura 4.1, ilustra o desenvolvimento e produção em massa dos componentes chave, a qual é acompanhada de uma queda de preços, e do aumento da qualidade associada às fibras ópticas. O aparecimento da tecnologia de sensores em fibra óptica como resultado da descida dos custos de um número importante de componentes de alta qualidade, possibilitou a fabricação de produtos competitivos de modo a ir ao encontro das necessidades do mercado.

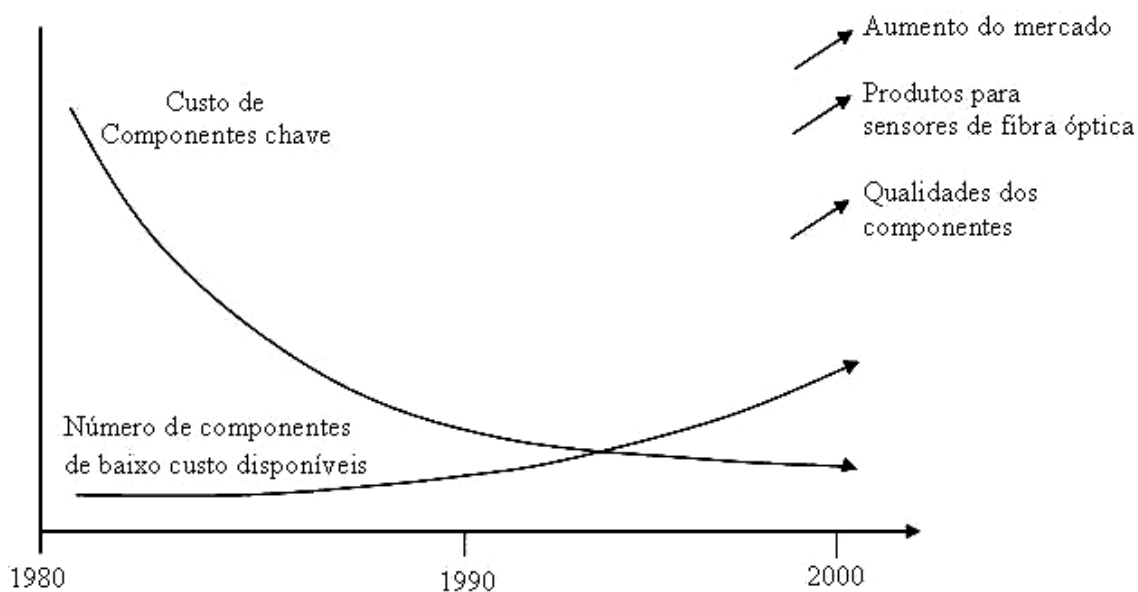


Figura 4.1 – A qualidade dos componentes em oposição à redução dos preços dos componentes chave.

## 4.2 – A fibra óptica: princípios

Durante os séculos XVIII e XIX surgiram novas ideias sobre a natureza da luz até que, em 1864, o físico inglês Maxwell apresentou a sua teoria electromagnética da luz, onde afirmava que ela era produzida por vibrações de partículas carregadas electricamente, gerando uma série de ondas do tipo electromagnético. Para chegar a esta conclusão, Maxwell calculou a velocidade das ondas electromagnéticas e comprovou que coincidia com a da luz, ou seja,  $3 \times 10^8$  m/s. A expressão básica que relaciona o

comprimento de onda,  $\lambda$ , a velocidade de propagação,  $v$ , e a frequência,  $f$ , de uma onda electromagnética é apresentada na equação seguinte:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4.1)$$

O espectro de frequências da luz, sendo mais elevado que as ondas de rádio, o seu comprimento de onda é, no entanto, menor. As ondas de rádio emergem através da reflexão nos guias de onda metálicos, assim, e de igual forma, pode-se fazer viajar a luz através de reflexões numa substância adequada. Esta ideia é a essência da utilização da fibra óptica. Na figura 4.2, apresenta-se o espectro da luz, com a indicação da zona do espectro visível, assim como os três principais comprimentos de onda mais usados pelos sistemas actuais de fibras ópticas, ou seja, nos 850 nm, nos 1300 nm e 1550 nm.

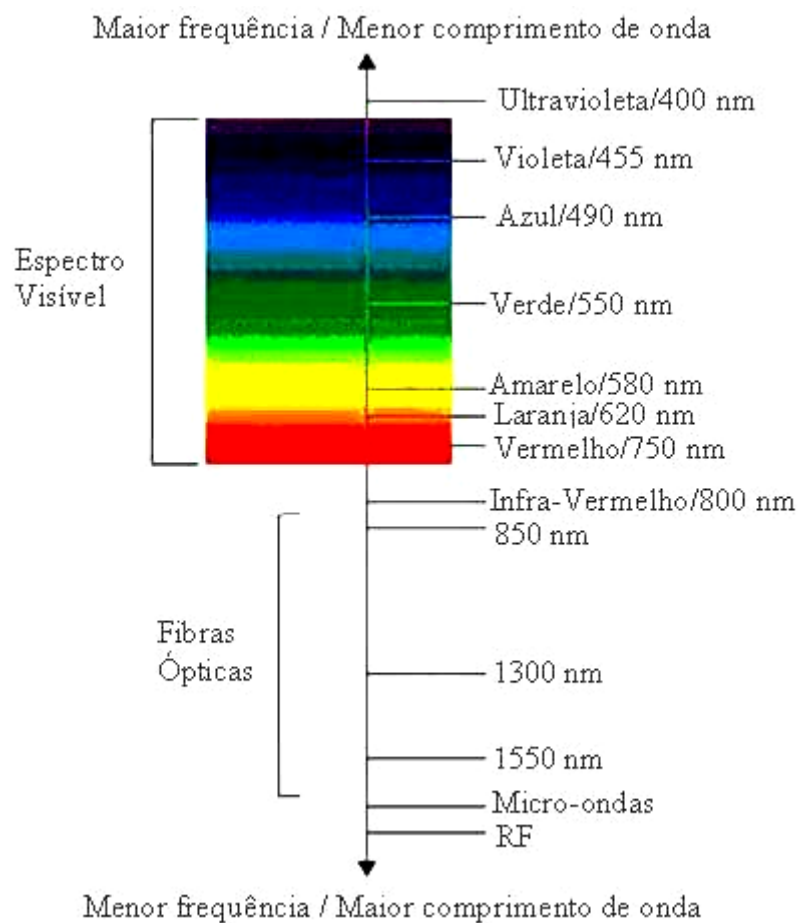


Figura 4.2 – Espectro da luz, com a indicação dos comprimentos de onda usados em sensores de fibra óptica.



A reflexão é a mudança de direcção do feixe de luz, quando este colide contra uma superfície. A refacção consiste na mudança de direcção do feixe, quando a luz passa de um meio para outro de diferente densidade, figura 4.3.

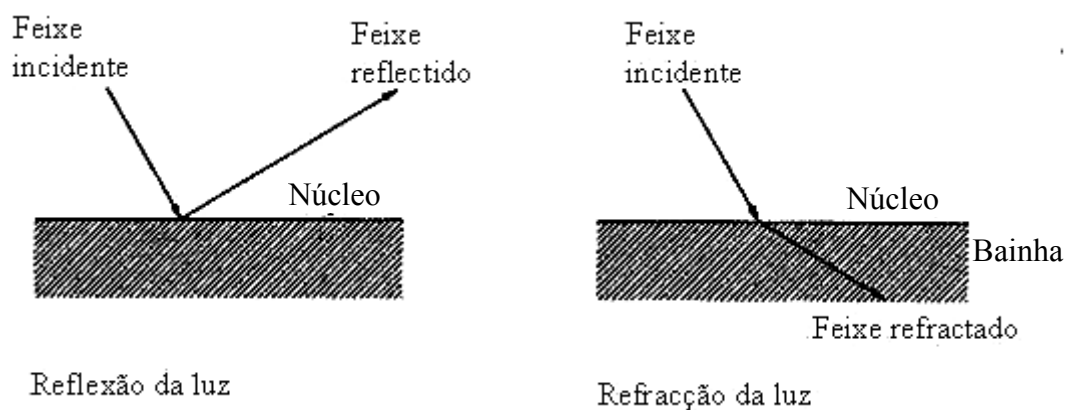


Figura 4.3 – Reflexão e refacção da luz [98].

As ondas electromagnéticas da luz tendem a viajar mais facilmente através de um meio com alto índice de refacção. Por isso, o material óptico deve ser aquele que tenha maior índice de refacção dentro da fibra óptica, como é o caso do núcleo. Na figura 4.4, pode-se ver a constituição típica de uma fibra óptica.

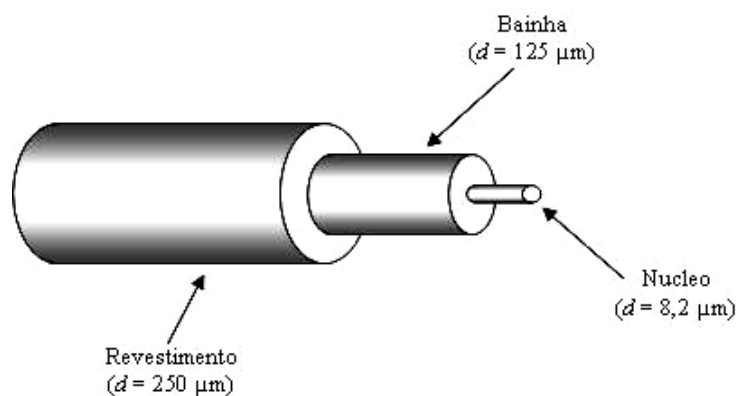


Figura 4.4 – Constituição da fibra óptica.

A luz que viaja no núcleo é de primordial importância, uma vez que é ela que transporta a informação. O núcleo está coberto com um material com um índice de refração menor e que constitui a bainha, figura 4.4. Estes dois materiais reorientam a luz em direcção ao seu centro de forma a impedir que esta se perca através dos lados. O fenómeno descrito é, assim, conhecido como reflexão interna total, que é, um dos princípios fundamentais da óptica. Para prevenir que o conjunto composto pelo núcleo e a bainha sofra danos, este é geralmente encapsulado por um material de plástico, ou outro, dependendo da aplicação na qual a fibra óptica venha a ser implementada, designado como revestimento.

Uma forma de compreender melhor estes conceitos é através da lei de Snell, cuja expressão é:

$$n_1 \times \sin \theta = n_2 \times \sin \phi \quad (4.2)$$

onde  $n_1$  é o índice de refração do meio material no qual a luz inicialmente viaja, isto é, o núcleo da fibra óptica,  $n_2$  é o índice de refração da bainha,  $\theta$  o ângulo entre o feixe incidente e a normal à interface, e  $\phi$  o ângulo entre o feixe refractado e a normal à interface no ponto de incidência. Conforme se observa no esquema da figura 4.5.

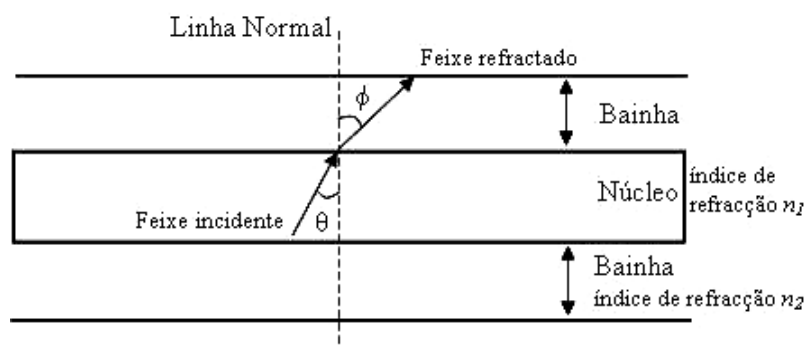


Figura 4.5 – Aplicação da lei de Snell [98].

Existe um ângulo, denominado crítico,  $\theta_c$ , a partir do qual se produz a reflexão total. Para qualquer ângulo menor do que esse, parte da luz sairá do núcleo em direcção

à bainha, podendo mesmo escapar-se para o espaço exterior, ou revestimento. Por isso, os materiais do núcleo e da bainha devem ter um índice de refração de tal modo que o feixe de luz que se dirige do núcleo para o exterior forme com a vertical da superfície da bainha, um ângulo maior que o crítico para que ele possa reflectir-se totalmente e voltar ao núcleo, figura 4.6. Em que o índice de refração do núcleo é ligeiramente superior ao do índice de refração da bainha.

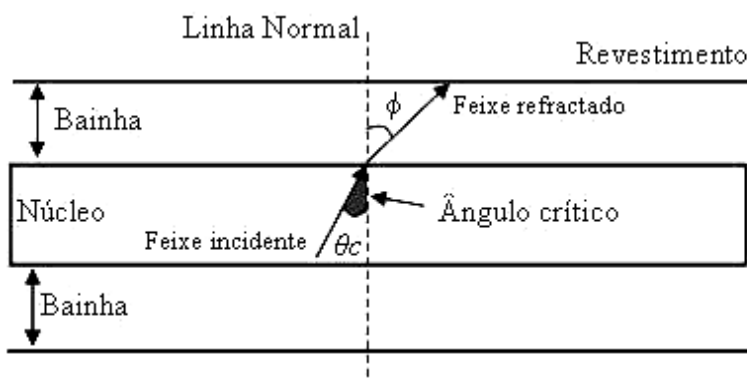


Figura 4.6 – Ângulo crítico [98].

Quando um feixe de luz passa de um meio com um índice de refração maior para um meio de índice menor ocorre refração, ou seja, uma certa quantidade do feixe incidente é reflectido. Se o feixe incidente formar um ângulo com a normal, também chamado de ângulo crítico, tal que  $\theta_0 = \theta_c$ , então nenhuma refração irá ocorrer. Nesta situação o feixe refractado propaga-se ao longo da interface. Quando o feixe de luz incidente formar um ângulo, que é superior a  $\theta_c$ , o feixe de luz é totalmente reflectido na interface e não haverá qualquer refração, figura 4.7.

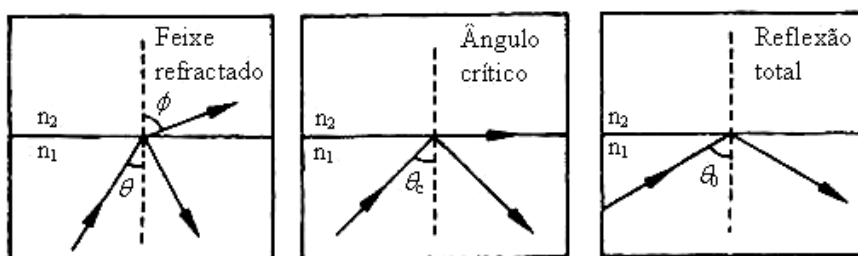


Figura 4.7 – Refracção, reflexão total e ângulo crítico.

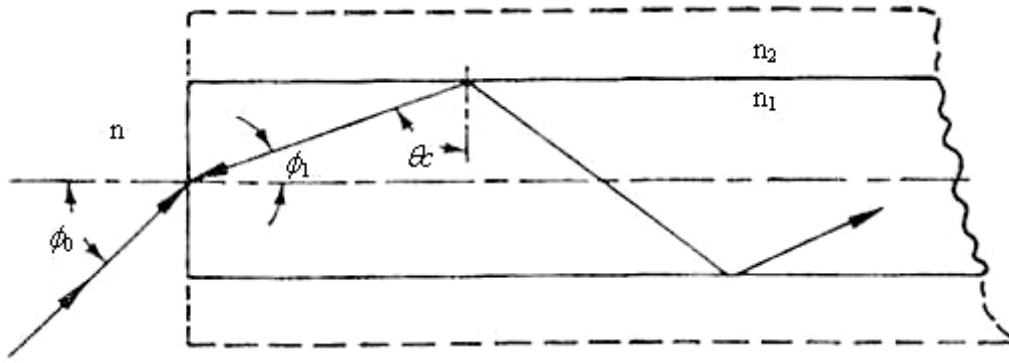


Figura 4.8 – Feixe incidência na fibra e sua reflexão.

Na figura 4.8, pode-se observar, que quando um feixe de luz incide num extremo da fibra com um ângulo teta, ele será refractado para o núcleo da fibra. Se o feixe viajar através do meio de maior índice de refração, núcleo, com um ângulo maior do que  $\theta_c$ , este será reflectido nas paredes da interface com múltiplas reflexões e irá emergir no outro extremo da fibra óptica. Para uma fibra circular, o ângulo de entrada e o ângulo de saída são iguais. Assim tendo em atenção a lei de Snell, para a fibra óptica, com um índice no núcleo de  $n_1$ , um índice na bainha de  $n_2$  e no meio que rodeia a fibra, um índice de  $n$ , pode-se então escrever;

$$\begin{aligned}
 n \times \sin \phi_0 &= n_1 \times \sin \phi_1 \\
 &= n_1 \times \sin(\pi/2 - \theta_c) \\
 &= n_1 [1 - (n_2/n_1)^2]^{1/2} (*) \\
 &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \text{N.A.}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

A quantidade  $n \times \sin \phi_0$ , é definida como abertura numérica, N.A. [(\*) para  $\theta = \theta_c$ ,  $\phi = 90^\circ$ , desta forma  $\sin \theta_c = n_2/n_1$ ]. A abertura numérica, N.A., é determinada pela diferença dos índices de refração entre o núcleo e a bainha, valor que dá uma medida da capacidade de aceitação da luz na fibra óptica, figura 4.9.

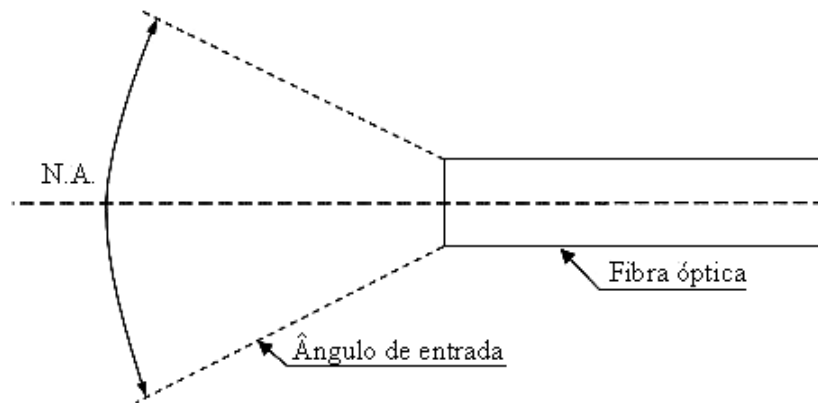


Figura 4.9 – Ângulo de entrada da luz na fibra óptica. Abertura numérica (N.A.).

#### 4.2.1 – Tipos de fibras ópticas

De acordo com a forma como os feixes de luz se propagam pela fibra óptica, podemos ver as características de três configurações básicas nas fibras [99]. Assim podem-se apresentar como multimodo, ou seja, com um determinado número de modos, e ainda distinguir-se entre as que têm índice em degrau, e as que têm índice gradual. Mas também as fibras monomodo, que se apresentam com um só modo e com um índice em degrau, figura 4.10.

Nas fibras ópticas multimodo, com índice em degrau, o índice de refração do núcleo é completamente diferente do índice de refração da bainha. Desta forma, durante a transmissão, a luz choca com as paredes da bainha reflectindo-se em direcção ao núcleo, como se pode ver na figura 4.10(a). Neste tipo de fibra óptica, o núcleo apresenta um índice de refração constante, como podemos ver pela figura através do perfil do índice. O outro tipo de fibra multimodo é o denominado índice gradual, onde o núcleo não mantém um índice de refração constante. Com esta técnica produz-se uma refração gradual à medida que os feixes de luz penetram na bainha, como se pode observar na figura 4.10(b).

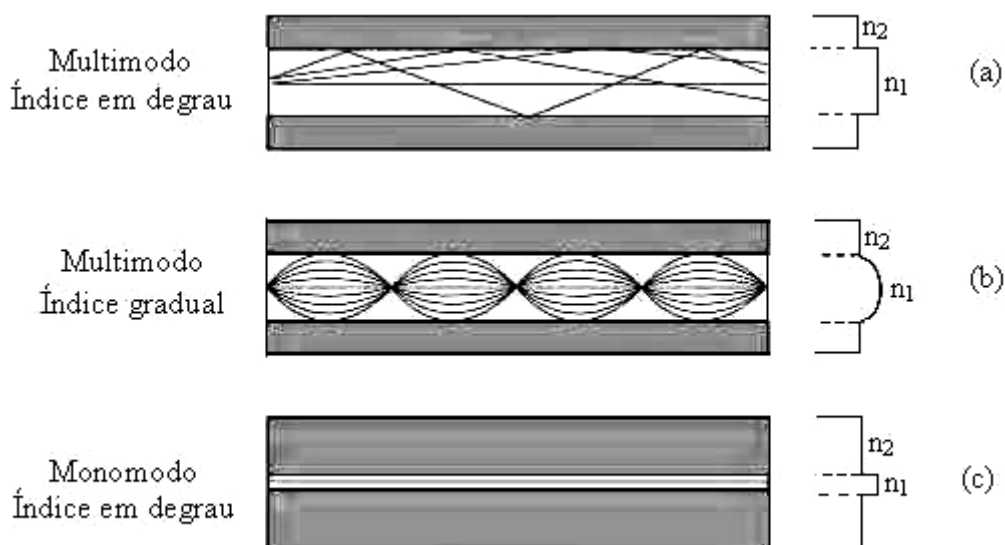


Figura 4.10 – Perfil do índice de refração da fibra óptica multimodo e monomodo.

O tipo de fibra monomodo, geralmente apresenta um núcleo finíssimo, da ordem de alguns micrómetros ( $\approx 8,2 \mu\text{m}$ ), tal como mostra o esquema da figura 4.4, e é através desse núcleo que os feixes de luz se propagam, como se observa na figura 4.10(c), na qual se verifica a existência de apenas um modo. Este tipo de fibra foi usado na realização dos sensores ópticos utilizados neste trabalho. É também o tipo de fibra que apresenta um pulso de saída com menor dispersão e mais fino.

As fibras multimodo com índice gradual são usadas para aumentar a largura de banda, isto é, a capacidade de transportarem mais informação, quando comparadas com as de índice em degrau. No entanto, este tipo de fibras não é particularmente usado na tecnologia dos sensores. Nesta tecnologia, o maior destaque vai para as fibras com índice em degrau. Na tabela 4.1, podem-se ver as propriedades dos dois tipos de fibra mais usuais.

Tabela 4.1 – Propriedades típicas de dois tipos de fibra [100].

| Tipo                           | Perdas<br>(db/km) | N.A.      | Dâmetro<br>do núcleo<br>( $\mu\text{m}$ ) | Razão<br>núcleo/bainha | Comprimento<br>de onda<br>(MHz-km) |
|--------------------------------|-------------------|-----------|---|------------------------|------------------------------------|
| Multimodo                      |                   |           |   |                        |                                    |
| Índice em degrau               |                   |           |   |                        |                                    |
| Vidro/Vidro                    | 400-600           | 0,4 -0,6  | (50-70)                                   | 0,9 -0,95              | 20                                 |
| Plástico/Sílica                | 3-10              | 0,3 – 0,4 | 200-600                                   | 0,7                    | 20                                 |
| Vidro/Vidro<br>(baixas perdas) | 2-6               | 0,2 -0,3  | 50-200                                    | 0,4 -0,8               | 20                                 |
| Monomodo                       | < 1               | 0,15      | 5-8                                       | 0,04                   | 1000                               |

#### 4.2.2 – Equações de propagação de ondas electromagnéticas na fibra óptica

A fibra óptica tem um índice de refração constante no núcleo, e também constante na bainha, mas é descontínuo na zona de interface. É, assim, considerada uma fibra monomodo com índice de refração em degrau. No caso destas fibras com um só modo de propagação, recorre-se à teoria ondulatória, considerando-se que o campo electromagnético propaga-se principalmente no núcleo da fibra óptica, e que é praticamente nulo na zona externa deste, onde tende rapidamente para zero [101].

A propagação das ondas electromagnéticas em guias de onda cilíndricas é expressa pelas equações de Maxwell, em coordenadas cilíndricas [100]:

$$\frac{d^2\psi}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\psi}{d\rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{d^2\psi}{d\phi^2} + (k^2 - \beta^2)\psi = 0 \quad (4.4)$$

onde,  $\psi$  é a função de onda da luz guiada,  $\rho$  é o parâmetro radial,  $k$  é o vector de onda do meio,  $\beta$  é o vector de onda ao longo do eixo da fibra, e  $\phi$  o ângulo azimute. Assumindo que a função de onda toma a forma:

$$\psi = AF(\rho)e^{i\nu\phi} \quad (4.5)$$

A equação de Maxwell transforma-se numa equação de Bessel. Desta forma as condições fronteira determinam que no eixo ( $\rho = 0$ ), o campo tem um valor finito. No entanto, o campo torna-se zero no infinito ( $\rho = \infty$ ). Como resultado, as componentes longitudinais do campo, são as seguintes:

$$AJ_v(ur/a)e^{iv\phi}, \rho < a \text{ (núcleo)} \quad (4.6)$$

$$BK_v(wr/a)e^{iv\phi}, \rho > a \text{ (bainha)} \quad (4.7)$$

onde  $J_v(ur/a)$  e  $K_v(wr/a)$  são as funções de Bessel de primeira e segunda ordem, respectivamente, com:

$$U^2 = (k_1^2 - \beta^2)a^2$$

$$k_1 = 2\pi n_1 / \lambda_0$$

$$w^2 = (\beta^2 - k_2^2)a^2$$

$$k_2 = 2\pi n_2 / \lambda_0$$

$$w^2 + U^2 = (2\pi a / \lambda_0)^2 (n_1^2 - n_2^2) = V^2 \quad (4.8)$$

Em que os índices 1 e 2 correspondem ao núcleo e à bainha respectivamente, enquanto o  $a$  é o raio do núcleo.

O termo  $w^2 + U^2$  é constante para todos os modos e é uma característica da fibra óptica. O parâmetro  $V$  representa o número de modos numa fibra, e está relacionado com a abertura numérica da seguinte forma:

$$V^2 = \frac{2\pi a}{\lambda_0} (N.A.)^2 \quad (4.9)$$



Para  $V < 2,405$ , a fibra só suporta um único modo, e é então dita monomodo. Quando o  $V > 2,405$ , outros modos podem existir, com o número de modos a aumentar à medida que o  $V$  aumenta.

As fibras monomodo são fortemente dependentes do comprimento de onda, enquanto que as fibras multimodo são relativamente insensíveis à variação do comprimento de onda [100]. Para uma fibra monomodo, à medida que  $\lambda_0$  aumenta,  $V$  diminui.

O feixe de luz tende a entrar na bainha sofrendo uma dispersão se a fibra estiver sujeita a algum tipo de curvatura. Esta condição é conhecida como corte em comprimento de onda. A condição em si pode variar com os parâmetros da fibra. As fibras multimodo não estão sujeitas a este corte em comprimento de onda.

### 4.3 – Sensores em fibra óptica

Num percurso com mais de vinte anos, a tecnologia dos sensores em fibra óptica, hoje em dia, encontra campo de aplicação praticamente em todos os segmentos da indústria, desde a engenharia química, aeronáutica, electrotécnica, construção civil, indústria automóvel, principalmente na monitorização e instrumentação e controlo. A qualidade associada às fibras ópticas tem feito dos sensores em fibra óptica um substituto natural de muitos dos tradicionais sensores de base eléctrica para a medição de deslocamento, rotação, temperatura, pressão, medição de campos eléctricos e magnéticos, entre outros. A sua utilização como elemento sensor associa todas as propriedades comuns aos sensores de fibra óptica, tais como a imunidade a interferências electromagnéticas, serem electricamente passivos, de dimensões e peso reduzidos, e com capacidade de multiplexagem à codificação inerente em comprimento de onda [93,99].

Os sensores em fibra óptica podem se divididos em três categorias: sensores com modulação de fase, sensores com modulação de intensidade e sensores com modulação em comprimento de onda [102-110].

#### **4.3.1 – Sensores com modulação de intensidade**

Os sensores com modulação de intensidade, geralmente, são usados para medições de deslocamentos ou algum tipo de perturbação física, que interage com a fibra ou com um transdutor mecânico acoplado à fibra óptica. Estes sensores detectam o valor da intensidade óptica transmitida pela fibra, uma vez que esta é uma função da grandeza física que a altera. A perda de luz pode estar associada com a transmissão, reflexão, microcurvatura, ou outro fenómeno tal como a absorção, a dispersão ou a fluorescência, que poderá ser incorporado na fibra óptica ou então num alvo que será transmissivo ou reflectivo [111-114]. Os sensores com modulação de intensidade, normalmente, necessitam de mais luz para funcionarem, e podem-se utilizar fontes incoerentes, tecnologia multimodo e componentes ópticos simples permitindo sistemas de reduzido custo. São extremamente competitivos do ponto de vista técnico e económico, podendo ser usados numa vasta área de aplicações inclusivamente em ambientes industriais. O conceito de sensor de transmissão, reflexão e microcurvatura, são os mais usuais, dado que na sua essência são sensores de deslocamento.

#### **4.3.2 – Sensores com modulação de fase**

Esta categoria de sensores com modulação de fase necessita de fontes de luz coerente, assim como dispositivos complexos de controlo de polarização, dado que a variável a ser medida provoca uma modulação de fase da radiação luminosa. A diferença de fase pode ser medida com extrema sensibilidade. Estes sensores são muito mais precisos do que os sensores de modulação de intensidade, podendo ser usados numa gama de aplicações dinâmicas muito maior. No entanto, na maior parte das vezes acarretam custos elevados. As suas aplicações verificam-se em sistemas aonde os custos não são necessariamente o factor de maior importância.

As técnicas interferométricas são usadas neste tipo de sensores, para detectar pressão, rotação e campo magnético, sendo que as duas primeiras aplicações referidas são as de maior amplitude em uso [115-121]. Este tipo de sensores além de necessitar de fontes de luz coerentes e fibras monomodo, também requer dispositivos complexos de controlo de polarização, incluindo, por vezes, fibras especiais de manutenção de polarização, elevando por isso os seus custos. Contudo, este tipo de sensores oferece potencialmente a maior sensibilidade que pode ser medida, usando uma fonte de luz laser, sendo que o seu feixe é dividido da forma em que uma parte dessa luz viaje através de uma fibra monomodo, usada como referência, e a outra parte da luz irá viajar na fibra que servirá como elemento sensor, estando esta exposta às condições de perturbação.

#### **4.3.3 – Sensores com modulação em comprimento de onda**

Os sensores com modulação em comprimento de onda, detectam as variações associadas aos deslocamentos, à temperatura, ou à detecção de determinados elementos químicos, aplicando na guia de onda, fibra óptica, um revestimento adequado, por forma a torná-la mais sensível à aplicação a que é dirigida. O conceito de maior difusão associado à modulação em comprimento de onda está ligado às redes de Bragg [121-129]. A luz reflectida pelas redes obedece a uma condição de ressonância para um comprimento de onda específico. Qualquer alteração da grandeza física que esteja a ser medida pelo sensor modula o espectro da radiação óptica reflectida, ou mesmo transmitida.

Estes podem também ser considerados como sensores intrínsecos [130-136], em que a propriedade a ser medida alteram directamente algumas das propriedades da fibra óptica, nomeadamente as características intrínsecas da transmissão e reflexão. No entanto, a radiação luminosa continua a permanecer no interior da fibra óptica. Quando em certas aplicações específicas, em que a sensibilidade da fibra óptica é baixa, podem ser aplicados na fibra certos revestimentos exteriores, que em presença de determinados elementos, poderão ainda modificar de uma forma mais significativa as suas propriedades como guias de onda.

#### **4.3.4 – Algumas das vantagens e desvantagens dos sensores**

Com os avanços tecnológicos a surgirem e as metodologias e processos de concessão a evoluírem, podem-se reconhecer um conjunto muito interessante de vantagens para este tipo de sensores bem como alguns inconvenientes. Inicialmente e com a perspectiva de tentar aplicar os sensores em fibra óptica em situações nas quais os sensores tradicionais existentes, e produzidos em grande escala, já satisfaziam os requisitos técnicos necessários, a um custo reduzido, facto que em si, numa primeira fase conteve o desenvolvimento de um grande numero de sistemas de sensores em fibras ópticas.

##### **4.3.4.1 – Algumas vantagens**

Em geral os dispositivos ópticos e a fibra óptica são construídos com materiais dieléctricos que são quimicamente inertes. Estas propriedades conferem passividade eléctrica e química, as quais, em conjunção com a natureza da luz, fazem com que os sensores de fibra óptica sejam ideais para aplicações em ambientes hostis, corrosivos ou com risco de explosão [137-141]. Os sensores de fibra óptica podem também suportar altas temperaturas mercê do elevado ponto de fusão do vidro, e se forem usados com revestimentos especiais é ainda possível operar adequadamente em gamas de temperaturas mais elevadas.

Os sensores em fibra óptica são ainda imunes a qualquer tipo de interferência electromagnética e de radiofrequência e, por isso, podem ser usados em ambientes altamente contaminados sob o ponto de vista electromagnético ou de radiofrequência. Sensores electrónicos convencionais são potencialmente problemáticos para este tipo de ambientes uma vez que são sensíveis às interferências.

A compatibilidade biológica, a fiabilidade e a natureza não invasiva das fibras ópticas combinadas com a possibilidade de construir interfaces pequenas e simples, entre a unidade de processamento de sinal e o ponto de medida, fazem com que os sensores de fibras ópticas sejam os mais indicados para a detecção, medição e em alguns casos correcções de variáveis biomédicas.

Dados o tamanho e a natureza da fibra óptica, podem-se realizar transdutores em fibra óptica de pequeno tamanho e baixo peso. Estas vantagens tornar-se-ão ainda maiores quando a tecnologia associada à optoelectrónica e de óptica integrada for usada em grande escala, esperando-se importantes benefícios para várias indústrias tais como a indústria aeronáutica e a indústria espacial. Especialmente, porque a fibra óptica permite um fácil embebimento nos materiais compósitos, e ser uma parte integrante da estrutura. Estes sensores conseguem, apresentar uma maior sensibilidade, gama dinâmica e resolução quando comparados com os sensores convencionais. Esta sensibilidade pode ser extremamente importante em aplicações específicas, devido às óptimas características de transmissão das fibras ópticas, um grande número de sensores pode ser integrado nas estruturas dada a possibilidade de multiplexagem.

A distância do ponto de medida à unidade de processamento de sinal pode ser elevada (ordem de quilómetros) devido às excelentes propriedades da fibra óptica como canal de transmissão. Isto significa que a fonte da luz, o detector e a unidade de processamento de sinal podem estar instalados em locais remotos, longe de algum ambiente adverso onde se processe a medida.

#### **4.3.4.2 – Algumas desvantagens**

A sensibilidade do dispositivo transdutor em reflectir medidas não desejáveis para a grandeza física de interesse é um dos principais problemas. A necessidade de construir sensores de fibra óptica insensíveis a estas medições, obtendo assim uma maior discriminação das grandezas físicas em medição, tem desencadeado um enorme esforço de investigação ao longo dos anos. Por exemplo, no caso das redes de Bragg tem havido um esforço no sentido de discriminar a sensibilidade à temperatura em face da sensibilidade à deformação. Esta sensibilidade cruzada é uma importante desvantagem uma vez que pode fazer com que o sistema sensor produza resultados afectados com erros. Contudo, este género de problemas também existe nos sensores convencionais.

O custo dos sensores em fibra óptica face aos sensores tradicionais é, ainda, um dos óbices desta tecnologia. Este facto deve-se ao custo dos componentes que em

muitos casos, são feitos especialmente para a aplicação a que se destina, ou em pequenas séries, sendo um reflexo típico de uma tecnologia ainda emergente.

No entanto, o futuro é promissor. O crescente desenvolvimento tecnológico nesta área, a introdução de sensores em fibra óptica em aplicações mais comuns e acima de tudo a competição feroz entre as operadoras mundiais de telecomunicações fazem prever a continua descida nos preços dos componentes e sistemas ópticos vindo a reflectir-se, nos sensores em fibra óptica. Segundo algumas revistas periódicas de divulgação de equipamentos e componentes ópticos, a indústria de sensores em fibra óptica tem um potencial de crescimento significativo. Segundo as mesmas, prevê-se que as aplicações alvo nos próximos anos, sejam direccionadas para as áreas dos químicos, dos transportes, para a monitorização de estruturas, para a biomedicina e também para o ambiente [142-146].

## 4.4 – Redes de Bragg

Decorrente da importante descoberta da fotossensibilidade em fibras ópticas, foi desenvolvida uma nova série de componentes ópticos, designados por redes de Bragg em fibra óptica. As redes de Bragg são dispositivos comparativamente simples que, na sua forma mais básica, consistem na modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica, numa determinada zona da fibra escolhida. As redes de Bragg, inscritas pelo método baseado na exposição da fibra óptica à radiação ultravioleta [147], são relativamente fáceis de fabricar. O método da fabricação que induz perturbações mínimas na estrutura, é cada vez menos dispendioso e tem permitido a produção em massa. Beneficiando das propriedades das fibras ópticas, como a transmissão com baixas perdas, imunidade a interferência electromagnética, baixo peso e isolamento eléctrico, as redes de Bragg em fibra óptica conferem grande versatilidade e flexibilidade e são componentes promissores que têm vindo a estimular várias e significativas inovações na área das telecomunicações e, mais recentemente, na área dos sensores em fibra óptica.

#### 4.4.1 – O aparecimento das redes por fotossensibilidade

A observação do efeito não linear designado por fotossensibilidade em fibras ópticas foi inicialmente apresentada em 1978, por Hill *et al.* [147,148]. Ela ocorreu durante uma experiência, cujo objectivo era o estudo dos efeitos não lineares numa fibra com características especiais. A fibra de sílica usada tinha um núcleo de diâmetro muito pequeno e dopada com germânio. Foi exposta a um feixe laser de iões de Árgon a 488 nm, ao núcleo da fibra, tendo sido observado que após uma exposição prolongada havia um aumento da atenuação na fibra. No desenrolar deste estudo, também foi verificado que havia um aumento significativo da luz reflectida pela fibra, em função do tempo de exposição, observando-se ser proporcional à atenuação durante a transmissão. Concluiu-se que o aumento da reflectividade era o resultado de uma perturbação periódica do índice de refacção ao longo da fibra. Este novo efeito não linear em fibras ópticas, responsável pela modulação do índice de refacção, designa-se por fotossensibilidade.

Nesta experiência, o feixe de luz laser Ultra Violeta (UV) ao incidir no núcleo da fibra interferia com o feixe de luz reflectido formando assim um padrão de interferência. Os pontos de maior intensidade neste padrão resultavam numa alteração permanente do índice de refacção na fibra fotossensível, formando uma rede de difracção, designadas na altura como redes de Hill. Esta perturbação permanente do índice apresenta o mesmo período espacial do que o padrão de interferência, com um comprimento limitado apenas pelo comprimento de coerência da radiação incidente na fibra. Esta estrutura periódica actuou como um reflector distribuído em que acoplou o feixe de luz na direcção de propagação para a direcção de contrapropagação.

Meltz *et al.* [149], em 1989, apresentaram uma nova metodologia de fabricação de redes de Bragg em fibra óptica por exposição UV transversal de uma fibra fotossensível, através de uma fonte laser com emissão UV, com um comprimento de onda na ordem dos 240 nm, aproximadamente metade do comprimento de onda do laser de Árgon (488 nm). Esse comprimento de onda foi escolhido por estar próximo do pico de absorção a 240 nm, correspondente a um defeito associado à deficiência de oxigénio na estrutura química da fibra óptica [149]. A deficiência de oxigénio na sílica é conhecida por ser a causa da fotossensibilidade nas fibras ópticas dopadas com germânio [150].

Assim, o mecanismo da fotossensibilidade seria um processo de absorção de um fóton. A intersecção de dois feixes no núcleo da fibra resultam num padrão de interferência que é convertido, pela fotossensibilidade, na modulação espacial do índice de refração do núcleo, dando origem à formação de redes de difracção.

Esta técnica de inscrição externa de redes de Bragg em fibras ópticas depende não só do comprimento de onda do feixe incidente na fibra, mas também do ângulo de incidência entre os dois feixes [149]. Assim, este método permite produzir redes de Bragg com qualquer comprimento de onda de ressonância através um simples ajuste do ângulo de incidência. A passagem do processo de absorção de dois fótons para um processo de absorção de um fóton permitiu aumentar a eficiência do mecanismo da fotossensibilidade devido, essencialmente, à excitação directa da banda de absorção a 244 nm característica da sílica dopada com germânio [150]. Este avanço foi determinante no desenvolvimento de diferentes técnicas de exposição UV, tornando possível a realização flexível de redes de Bragg.

No entanto, a maioria das fibras ópticas disponíveis apresentam-se com baixa fotossensibilidade. Várias técnicas têm sido utilizadas para incrementar esses valores, tais como a co-dopagem dos núcleos com vários elementos químicos ou um aumento da concentração de Germânio. A técnica mais utilizada pela sua simplicidade é a técnica da hidrogenização prévia da fibra a gravar [151]. A difusão de Hidrogénio no interior da fibra, resultante da sua exposição a pressões superiores a  $101,3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  ( $\approx 100 \text{ bar}$ ) durante vários dias, seguida de uma gravação imediata, permite aumentar a fotossensibilidade em cerca de 2 ordens de grandeza, quando comparada com a mesma fibra antes da hidrogenização [152].

#### **4.4.2 – Fundamentos das redes de Bragg**

As origens dos mecanismos físicos que suportam a fotossensibilidade ainda não estão completamente estabelecidas, estando, em princípio, associados à transformação fotolítica de centros atómicos absorptivos presentes na matriz vítrea. No entanto, a fotossensibilidade constitui um método prático para a realização de estruturas periódicas



no núcleo das fibras ópticas. As redes de difracção são estruturas de fase ou de amplitude com dimensões superiores ao período de modulação. Nas fibras ópticas, a extensão de uma rede de difracção pode ser vista como uma dimensão longitudinal sobre a qual existe a modulação da amplitude do índice de refração. Existem vários tipos de redes de Bragg em fibra óptica, de acordo com a modulação do índice de refração, como por exemplo, redes aperiódicas, apodizadas e amostradas [149,153].

Na sua forma mais simples, as redes de Bragg consistem na modulação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica monomodo. A acção da modulação periódica do índice de refração sobre a luz propagada no núcleo da fibra óptica é ilustrada na figura 4.11, na qual se mostra também o tipo de sinal obtido, quer em transmissão quer em reflexão, quando iluminada por uma fonte de espectro largo. A modulação espacial do índice de refração do núcleo tem um período de modulação  $\Lambda$ .

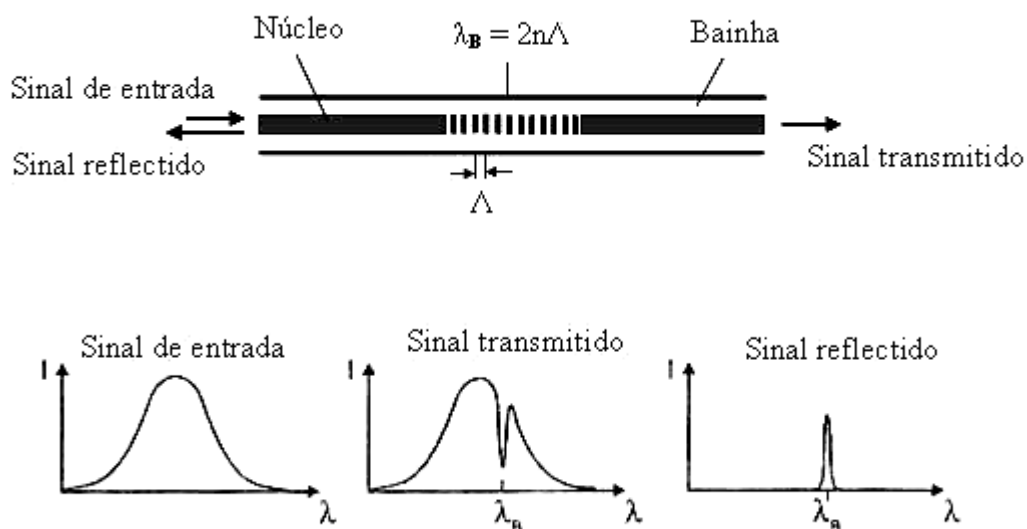


Figura 4.11 – Princípios de operação das redes e Bragg.

A modulação pode ser representada como uma alteração sinusoidal, de amplitude constante, ao longo do núcleo da fibra (eixo  $Z$ ), ou seja,

$$n(z) = n + \Delta n \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \right] \quad (4.10)$$

onde  $n$  é o índice de refração do núcleo,  $\Delta n$  é a amplitude de modulação (tipicamente,  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$ ),  $\Lambda$  é o período de modulação e  $z$  a distância ao longo do eixo longitudinal da fibra.

A luz propagada ao longo do núcleo de uma fibra óptica é espalhada nas regiões da rede de difracção em certas condições associadas com o período da modulação do índice de refração, com um período uniforme,  $\Lambda$ . Neste caso, a luz reflectida interfere construtivamente, pelo que a condição de Bragg é satisfeita. O pico de onda reflectido (directção de contrapropagação da luz) tem um comprimento de onda bem definido e é conhecido por comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ . Esse comprimento de onda de Bragg depende do período,  $\Lambda$ , da rede de difracção, figura 4.11, sendo fixo para um período uniforme.

A condição de Bragg implica a conservação de energia e de momento. A conservação de energia requer que a frequência de radiação da onda incidente seja igual à frequência de radiação da onda reflectida tal que [154]:

$$h\omega_i = h\omega_r \quad (4.11)$$

onde  $\omega_i$  e  $\omega_r$  são as frequências de radiação incidente e reflectida, respectivamente.

A conservação de momento implica que o vector de onda da rede de difracção seja igual à diferença entre o vector de onda da radiação reflectida e o vector de onda da radiação incidente, tal que:

$$\vec{k} = \vec{k}_r - \vec{k}_i \quad (4.12)$$

O vector de onda tem por direcção a normal às regiões da rede onde se verifica a variação do índice de refração e por módulo  $k = \frac{2\pi}{\Lambda}$ . Os vectores de onda  $\vec{k}_i$  e  $\vec{k}_r$  têm a mesma direcção mas sentidos opostos. Os respectivos módulos correspondem às constantes de propagação  $\beta$ , na direcção de propagação, e  $-\beta$ , na direcção de contrapropagação. Assim, a conservação de momento para uma fibra monomodo é, de acordo com a equação 4.11, dada por:

$$\beta_{01} - (-\beta_{01}) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4.13)$$

onde  $\beta_{01} \equiv \beta = \frac{2\pi n}{\lambda_B}$  é uma constante de propagação para o modo LP<sub>01</sub>, que é característico da fibra monomodo. A partir da equação 4.13, obtém-se a condição de Bragg de 1ª ordem:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (4.14)$$

onde  $\lambda_B$  é o comprimento de onda de Bragg,  $n$  é o índice de refração efectivo do modo guiado no núcleo da fibra e  $\Lambda$  é o período da rede de Bragg.

A reflectividade da rede de Bragg uniforme pode ser obtida com base na teoria dos modos acoplados [154] e tem a seguinte expressão:

$$R = \frac{K^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} \quad (4.15)$$

com  $L$ , o comprimento da rede,  $\Delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$  o desfasamento entre a constante de propagação e o vector de onda  $\vec{k}$  da rede e  $S = (K^2 - \Delta\beta^2)^{1/2}$  podendo esta assumir valores imaginários, mas nessa situação, as funções hiperbólicas são naturalmente substituídas pelas respectivas funções trigonométricas. O coeficiente de acoplamento  $K$ , é dado por:

$$K = \frac{\pi \Delta n \eta}{\lambda_B} \quad (4.16)$$

em que  $\eta$  é o coeficiente de confinamento.

A reflectividade máxima ocorre quando  $\Delta\beta = 0$ , ou seja quando a constante de propagação está em fase com a modulação espacial do índice de refração  $n$ , permitindo estabelecer a conhecida condição de Bragg dada pela equação 4.14. Desta forma obtém-se,

$$R_{\max} = \tanh^2(KL) \quad (4.17)$$

sendo que a reflectividade é directamente proporcional a  $L$  e  $\Delta n$ .

A largura a meia altura do espectro (FWHM, *Full With Half Medium*) pode também ser calculada pela expressão:

$$\Delta\lambda_{FWHM} \approx \lambda_B \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \frac{1}{N^2}} \equiv \Delta\lambda_B \quad (4.18)$$

onde  $\alpha$  é um parâmetro associado à eficiência da rede de difracção de Bragg e  $N$  é o número de períodos na modulação do índice de refração. O valor de  $\alpha$  que permite a melhor aproximação aos resultados experimentais encontra-se no intervalo  $[0,5; 1]$ . Este valor é  $\sim 1,0$  para redes fortes, ou seja, redes com reflectividades máximas e próximas de 100%, e  $\sim 0,5$  para redes fracas. Uma vez que  $\Delta n$  é um valor pequeno, a maior contribuição para  $\Delta\lambda_{FWHM}$  está no valor de  $N$ .

### 4.4.3 – A técnica da máscara de fase

A técnica da máscara de fase é um processo não interferométrico directo e um dos métodos mais usados na fabricação de redes de Bragg em fibras fotossensíveis, devido à sua simplicidade e boa reprodutibilidade. A máscara de fase é um substrato de sílica fundida com elevada qualidade, transparente à radiação UV, com uma superfície lisa de grande perfeição sobre a qual se inscreve uma rede de difracção pelo processo de fotolitografia. Assim, a máscara de fase torna-se um elemento óptico com capacidade para difractar o feixe UV em transmissão. A máscara de fase actua como um divisor de feixe em transmissão, figura 4.12. A sobreposição dos feixes transmitidos, correspondentes às diferentes ordens de difracção na proximidade da sua superfície, conduz à formação de um padrão de interferência, tornando possível a fabricação de redes de Bragg por modulação do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica fotossensível.

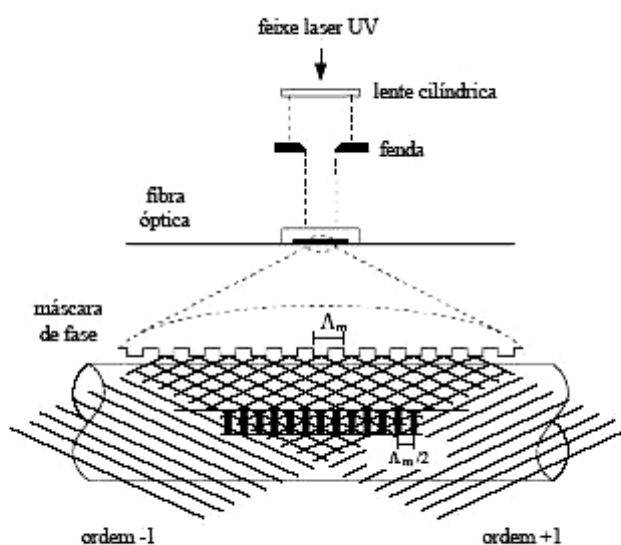


Figura 4.12 – Montagem experimental usada na fabricação de redes de Bragg através da técnica da máscara de fase [153].

O perfil da máscara de fase é caracterizado de tal forma que a ordem zero do feixe difractado é suprimida para valores inferiores a 1% da potência transmitida [155]. Por outro lado, os feixes principais difractados pela máscara de fase correspondem às ordens

$\pm 1$ , contendo cada um mais de 35% da potência transmitida. A interferência destas duas ordens resulta num padrão de interferência, cujo período  $\Lambda$ , corresponde a metade do período da máscara,  $\Lambda_m$ , levando, assim, à inscrição de redes de Bragg em fibras ópticas:

$$\Lambda = \frac{1}{2} \Lambda_m \quad (4.19)$$

A montagem experimental usada na fabricação de redes de Bragg com base na técnica da máscara de fase, é ilustrada na figura 4.12, mostrando em pormenor que o período do padrão de interferência é sempre metade do período da máscara de fase. A fibra óptica é mantida junto da superfície da máscara, sendo a radiação UV focada longitudinalmente na fibra através de uma lente cilíndrica.

A grande vantagem desta técnica é a possibilidade de usar feixes laser com baixa coerência temporal e espacial para formar interferência. Além do mais, o facto da fibra estar em contacto com a máscara de fase permite uma diminuição dos problemas associados à instabilidade e sensibilidade a vibrações mecânicas.

#### 4.4.4 – Multiplexagem de redes

Os sensores de redes de Bragg em fibra óptica têm a capacidade de medir o valor da grandeza em observação, em pontos discretos do espaço, fazendo uso de um único canal óptico [156-163]. É, no entanto, possível aumentar o número de pontos de medição recorrendo a técnicas de multiplexagem óptica, conforme se pode ver na figura 4.13, onde estão representadas algumas tipologias de multiplexagem reflectivas, em que só há um canal de comunicação com os sensores.

Assim, estes sensores podem estar a medir deformações e/ou temperatura, estando distribuídos ao longo de uma fibra óptica, cada sensor medindo o parâmetro de interesse num determinado ponto designado para o efeito. Em função desta possibilidade de distribuição espacial, estes sensores podem ser designados como quase-distribuídos.

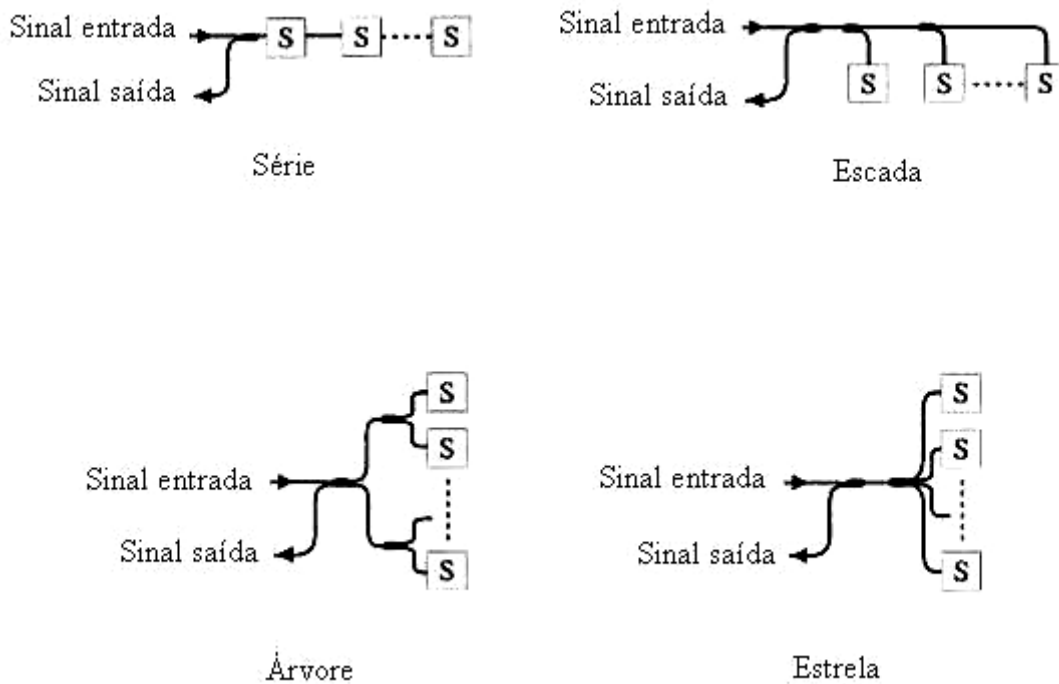


Figura 4.13 – Algumas das topologias de multiplexagem para reflexão. Só há um canal de comunicação com os sensores (S - sensor).

#### 4.4.5 – A birrefringência das redes

As formas espectrais como a birrefringência, que podem surgir nos espectros em reflexão das redes de Bragg em fibras ópticas, têm origens em variados mecanismos, entre os quais, os que se baseiam no efeito não geométrico do próprio núcleo, ou mesmo por tensão ocorrida em volta dele, por exemplo [177,178].

A birrefringência pode ser induzida no núcleo da fibra óptica quando a sua simetria circular é alterada, dando origem a uma distribuição do índice de refração anisotrópica. Assim, estas fibras têm usualmente uma forma do núcleo elíptica [179], podendo existir outras formas de originar a birrefringência, como seja através da

dopagem em diferentes regiões em torno do núcleo, ou ainda na fase da inscrição da rede de Bragg [180].

Este fenómeno pode também surgir mais tarde quando a fibra óptica estiver a ser aplicada e sofrer uma qualquer acção externa que dê origem a formação de dupla refacção, nomeadamente devido a um excesso de pressão, figura 4.14, levando a que esta possa ficar ligeiramente oval, ou então que tenha uma pequena curvatura, mais acentuada na zona da rede, por exemplo. A birrefringência pode, também, ocorrer quando a fibra óptica é embebida entre as camadas de material compósito, devido às tensões que se criam durante a cura do material compósito, originando tensões não uniformes em torno do núcleo, induzindo uma birrefringência, devido às alterações de índice de refacção do núcleo [178]. Uma das formas mais visíveis deste fenómeno com a produção das placas sensoras compósitas é a separação do pico central do comprimento de onda da rede de Bragg. Uma forma de identificação do fenómeno após o embebimento da fibra óptica, é precisamente verificar o estado de integridade da rede de Bragg, através do seu espectro em reflexão. Se ele se apresentar com dois picos em vez de um só, é sinal de que existe birrefringência na rede de Bragg embebida.

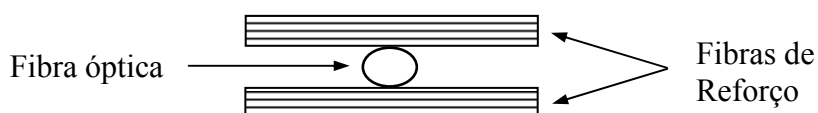


Figura 4.14 – A fibra óptica fica oval, por acção das fibras de reforço.

## 4.5 – Algumas das potenciais aplicações

A designação dos sensores é fundamentalmente pelo tipo de grandeza física que medem. Como exemplo desta situação temos os sensores mecânicos ou de vibração, que incluem medições de tensão mecânica, pressões, curvatura, deslocamentos, velocidade, aceleração, força e rotação [164-176], outro exemplo são os sensores térmicos, através



de emissão espectral, obtida por absorção, índice de refração, parâmetros de transmissão, e ressonâncias das redes de Bragg [181-188].

No entanto, outras grandezas físicas poderiam ser medidas, tais como o potencial eléctrico, campo eléctrico, corrente eléctrica e campo magnético, que se poderiam obter através dos efeitos electro-óptico e magneto-óptico, também conhecido como efeito de Faraday, com recurso a materiais e dispositivos fotónicos. São, assim, os sensores electromagnéticos [180-198]. Outro tipo de sensores existentes, são os de radiação [199-203], para os quais os raios-X e a radiação nuclear podem ser detectados através de efeitos de luminescência ou fluorescência, entre outros. Existem ainda os sensores que através das alterações na radiação luminosa, por absorção ou fluorescência por exemplo, permitem a detecção da composição de uma substância, em função da composição química existente, designando-se por sensores de composição química [204-213]. Existem também os sensores de caudal e nível dos fluidos, cujo funcionamento consiste da dispersão e da absorção provocadas por partículas em suspensão permitem medir o caudal e a turbulência dos fluidos [214-217]. Outros ainda, e que têm-se vindo a revelar como muito importantes para monitorização da saúde do ser humano são os sensores com aplicação na biomedicina [218-227], através dos quais a acidez, o nível de oxigénio, o nível de dióxido de carbono, a pressão sanguínea, assim como a monitorização da temperatura, são medidas através de técnicas baseadas em absorção e fluorescência.

## 4.6 – Interferómetros de Fabry-Pérot

As cavidades interferométricas, já referidas anteriormente, são mais um dos elementos sensores usados nos materiais compósitos para monitorização. Os interferómetros de Fabry-Pérot são sensores extrínsecos em fibra óptica (EFPI) e apresentam uma maior sensibilidade, particularmente aos fenómenos transitórios. Mas, ao contrário das redes de Bragg em fibra óptica, que dão uma medição absoluta, eles requerem uma desmodulação. Os interferómetros de Fabry-Pérot têm sido utilizados com sucesso para a medição de deformação [228] e a detecção de emissão acústica (EA)

[229-232]. As dificuldades da sua utilização residem na desmodulação que requer metodologias implicando elevados custos (lasers, etc.).

Na figura 4.15, está representado o esquema de um interferómetro de Fabry-Pérot extrínseco. Na situação em que se pretende o seu embebimento, este tipo de sensor dependendo do diâmetro do tubo capilar usado, torna mais difícil de conseguir uma espessura final de placa sensora, de valor inferior a 500  $\mu\text{m}$ , comparativamente com a fibra óptica, que tem um diâmetro de 250  $\mu\text{m}$ . Dependendo do material usado como tubo capilar o seu embebimento pode tornar-se um pouco mais complicado, no sentido de se conceberem placas sensoras com uma espessura fina, principalmente se esses tubos forem em vidro, normalmente apresentam-se com paredes de espessura extremamente finas o que dificulta o seu embebimento, devido ao perigo de rotura. Muito embora em muitas das aplicações, a razão do seu embebimento não implique espessuras muito finas. Este tipo de sensor é, fundamentalmente, dirigido para aplicações em que se pretendem medir vibrações.

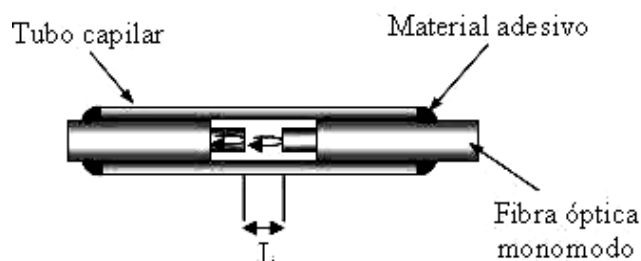


Figura 4.15 – Interferómetro óptico de Fabry-Pérot.

O meio existente entre os dois espelhos é o ar, logo com um determinado índice de refração. Como o esquema da figura 4.15 indica, parte da luz é logo reflectida pelo primeiro dos espelhos, sendo que a outra parte irá entrar na cavidade, e aí, uma parte dela também será reflectida. O resultado a observar poderá ser a interferência destes dois feixes, através de um sistema apropriado para desmodulação do sinal.

# Capítulo 5

## 5 – Caracterização e interrogação dos sensores ópticos

### 5.1 – Introdução

Foi caracterizada uma rede de Bragg, de entre as várias redes de Bragg utilizadas neste estudo, todas elas com 10 mm de comprimento. A rede usada para esta caracterização apresentava um comprimento de onda correspondente à ressonância de Bragg, de 1553,85 nm. O sinal de entrada é introduzido na rede de Bragg, através de um acoplador óptico 50/50, também usado para obter o sinal reflectido. A resposta da componente espectral reflectida e/ou transmitida pela rede de Bragg, quando iluminada por uma fonte óptica de espectro largo (cujas características se encontram em anexo), foi medida num analisador óptico de sinal, OSA. A fibra óptica utilizada na gravação das redes de Bragg, é uma fibra usada comercialmente da Corning® SMF-28™, cujo resumo da ficha técnica fornecida pelo fabricante é apresentada em anexo. Os resultados obtidos para os espectros em reflexão e transmissão podem ser observados na figura 5.1.

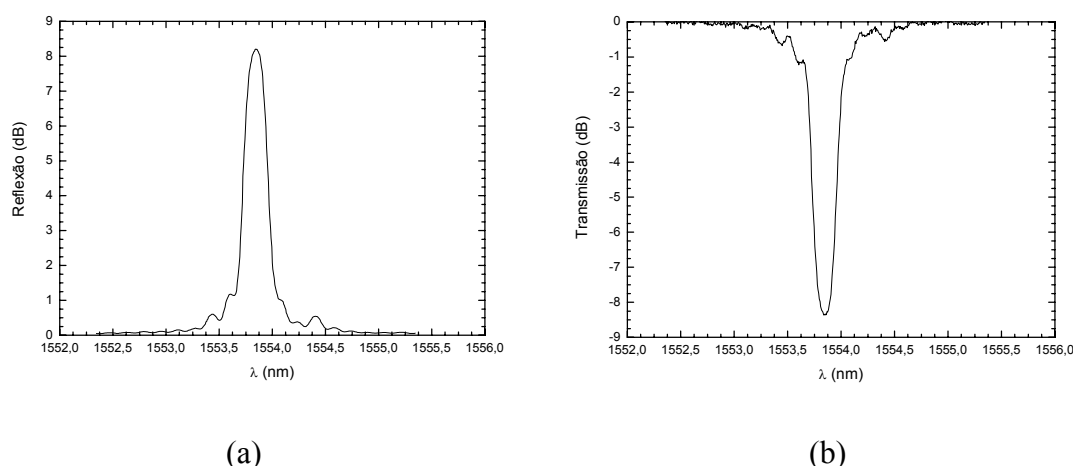


Figura 5.1 – Caracterização espectral de uma das redes de Bragg usadas, em reflexão (a) e em transmissão (b).

A gama de comprimentos de ondas correspondentes à ressonância de Bragg mais usados no trabalho realizado correspondeu, fundamentalmente, a valores em torno dos 1540 nm, 1550 nm e também dos 1560 nm.

## 5.2 – Sensibilidade à temperatura das redes

As redes de Bragg são sensíveis à influência de grandezas físicas tais como a temperatura, pressão e tensão [93]. A influência de qualquer grandeza que provoque uma alteração do índice efectivo ou do período da rede de Bragg, induz um desvio no respectivo comprimento de onda.

A resposta de uma rede de Bragg à temperatura deve-se ao coeficiente de expansão térmica inerente ao próprio material constituinte da fibra que, geralmente, é de sílica, e também à dependência do índice de refração com a temperatura. Para uma variação da temperatura  $\Delta T$ , o correspondente desvio na ressonância de Bragg é dado por [96]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (5.1)$$

em que  $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$  é o coeficiente de expansão térmica e  $\xi = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T}$  é o coeficiente termo-óptico. Para o caso de fibra de sílica dopada com germânio,  $\alpha \approx 0,55 \times 10^{-6} K^{-1}$  e  $\xi \approx 8,6 \times 10^{-6} K^{-1}$  [150]. Assim, para variações de temperatura, o desvio da ressonância de Bragg deve-se, essencialmente, à alteração do índice de refração efectivo.

O coeficiente de sensibilidade das redes de Bragg em fibra óptica usadas no estudo foi medido experimentalmente. Para esse efeito, usou-se uma rede de Bragg, com um  $\lambda_B = 1542$  nm, escrita numa fibra óptica da Corning<sup>®</sup>, submetida a variações de temperatura, colocando a fibra num recipiente com água, que foi aquecida até aproximadamente 80 °C.

Na figura 5.2, podemos ver a monitorização da variação do comprimento de onda da rede de Bragg. Esta rede não tem revestimento, como aliás a grande maioria dos sensores em rede de Bragg usados neste trabalho. A figura 5.2 mostra a dependência do comprimento de onda de Bragg para valores crescentes de temperatura.

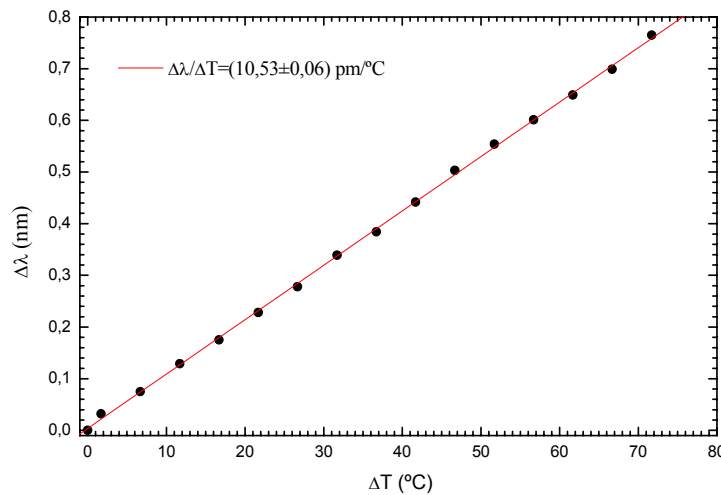


Figura 5.2 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura, para uma rede de Bragg sem revestimento.

Através da equação 5.1, pode-se verificar que  $\Delta\lambda_B$  varia linearmente com  $\Delta T$ , para valores constantes dos coeficientes de expansão térmica,  $\alpha$ , e termo-óptico,  $\zeta$ . O declive do ajuste linear realizado é assim de  $(10,53 \pm 0,06)$  pm/°C, permitindo obter a calibração da rede de Bragg em função da temperatura.

### 5.3 – Sensibilidade à deformação longitudinal

A resistência mecânica das fibras ópticas é determinada pela distribuição de imperfeições inerentes à própria composição química da sílica e defeitos provenientes de microfracturas com origem em diversos processos de manuseamento. O próprio processo de fabricação das redes de Bragg diminui a resistência mecânica das fibras, quer pela exposição de radiação UV, que provoca alteração da tensão no núcleo da fibra, quer pela remoção mecânica, ou química do revestimento da fibra.

A sensibilidade das redes de Bragg à aplicação de tensões mecânicas corresponde à variação longitudinal da rede, assim como à variação do índice de refração efectivo induzida por efeitos fotoelásticos. A variação do comprimento de onda de Bragg por aplicação de uma tensão mecânica resulta na deformação longitudinal  $\Delta\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  da rede de Bragg e é dada por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\Delta\varepsilon \quad (5.2)$$

A unidade de deformação usada é o microstrain,  $\mu\varepsilon$ , representando  $p_e$  o coeficiente fotoelástico da fibra, dado pela expressão seguinte:

$$p_e = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} = \frac{n_{ef}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (5.3)$$

em que  $p_{11}$  e  $p_{12}$  são os coeficientes do tensor elasto-óptico e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. Para fibras ópticas dopadas com germânio, os valores típicos são  $p_{11} \approx 0,113$ ,  $p_{12} \approx 0,252$ ,  $\nu \approx 0,16$  e  $n_{ef} \approx 1,482$ .

A rede de Bragg foi submetida a uma deformação longitudinal, utilizando para o efeito uma carruagem, com um parafuso micrométrico que permite deslocamentos mínimos de 0,002 mm. Para o registo efectuado foram aplicados sucessivos deslocamentos espaçados de 0,05 mm. A representação gráfica é apresentada na figura 5.3, e mostra a dependência linear da ressonância de Bragg em função da deformação longitudinal.

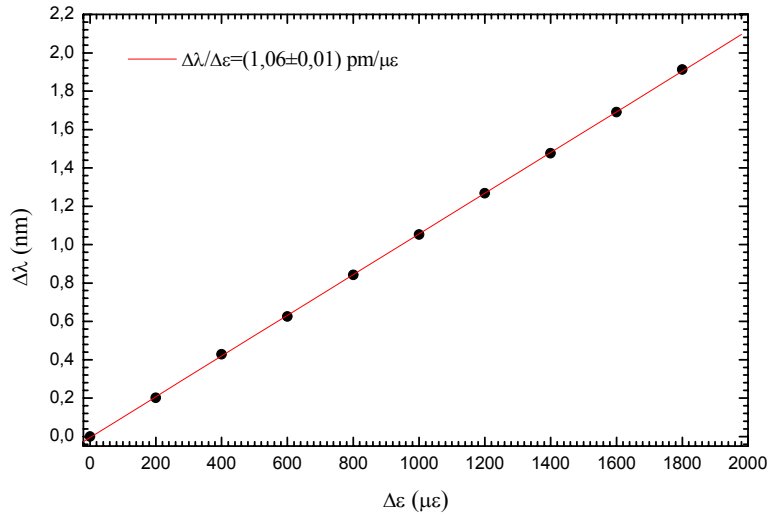


Figura 5.3 – Variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação longitudinal.

É verificada a resposta linear de  $\Delta\lambda_B$  com  $\Delta\epsilon$ , segundo a equação 5.2, para o coeficiente fotoelástico,  $p_e$ , constante. O declive do ajuste linear é  $(1,06 \pm 0,01)$  pm/ $\mu\epsilon$ , para um  $\lambda_B = 1542$  nm, permitindo obter a calibração da rede de Bragg em função da deformação imposta.

## **5.4 – A evolução da unidade de interrogação dos sensores de rede de Bragg em fibra óptica**

Os mais recentes desenvolvimentos da tecnologia, e em particular com a interrogação das redes de Bragg em fibra óptica, têm permitido a sua utilização generalizada em estruturas inteligentes baseadas em materiais compósitos. Especial interesse tem sido motivado pela monitorização de parâmetros físicos directamente inferidos a partir da medição da deformação localizada.

No início deste estudo colocou-se a questão do sistema de interrogação a utilizar com os sensores em rede de Bragg, dadas as potenciais aplicações das placas sensoras realizadas e a necessidade de um sistema de medição poder efectuar leituras dinâmicas, com a capacidade de monitorizar vários sensores em simultâneo, e com taxas de aquisição que pudessem variar em função das aplicações. Assim, no início, a interrogação dos sensores foi efectuada através de equipamentos laboratoriais de utilização mais genérica, com recurso fundamentalmente ao analisador de espectros óptico. Este tipo de sistema apresenta algumas desvantagens, nomeadamente a medição lenta do comprimento de onda (tipicamente uma leitura por cada 1,1 segundos). Valores que não permitem efectuar monitorizações dinâmicas. Além destas limitações, é de notar as elevadas dimensões do conjunto e a restrição da aplicabilidade deste sistema em instalações fora do laboratório, no caso da monitorização de estruturas em serviço.

Tendo como ponto de partida o universo de potenciais aplicações que envolvem a necessidade de medição de um número elevado de sensores, várias empresas desenvolveram sistemas de medição mais simples, robustos e de custo mais reduzido, nomeadamente a SmartFibres<sup>®</sup> e a FiberSensing<sup>®</sup>, por exemplo. Para conseguir sistemas com estas características, inúmeros esquemas têm sido vistos com base em técnicas de filtragem, técnicas interferométricas ou varrimento laser [107].

Para a aplicação dos sensores de rede de Bragg em fibra óptica, em materiais compósitos inteligentes é importante que os sistemas de interrogação sejam rápidos, fiáveis e que consigam ter taxas de aquisição aceitáveis. O presente trabalho teve como



objectivo principal melhorar o conhecimento e utilização dos sensores de rede de Bragg em fibra óptica embebidos em materiais compósitos, para aplicações estáticas e dinâmicas, daí a necessidade de considerar o problema do sistema de interrogação. Durante o presente trabalho passaram-se por diferentes fases de evolução de sistemas de aquisição e monitorização de sensores de Bragg em fibra óptica, num trabalho em colaboração com os investigadores da unidade de Optoelectronica do INESC-Porto. As diferentes etapas de evolução e desenvolvimento do sistema de interrogação e aquisição, nos seus passos principais, sem os pormenores técnicos, são aqui apresentadas.

### 5.4.1 – As diferentes etapas de evolução

Devido há necessidade de conhecer mais e melhor, e aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento das estruturas compósitas com sensores de redes de Bragg em fibra óptica embebidos, foram usadas três gerações de equipamentos com a capacidade de medição e de monitorização dinâmica de placas compósitas instrumentadas com sensores. Os sistemas de medição e interrogação utilizam a técnica de filtragem, sendo baseada em dispositivos optoelectrónicos, por sua vez constituídos pela integração de elementos micro-ópticos. O dispositivo base e central dos sistema está representado na figura 5.4, e consiste numa lente com a capacidade de focar a luz num cubo divisor de feixe (também designada de lente *grin*), este último com a função de dividir a luz reflectida pelo sensor de Bragg por dois fotodetectores: o fotodetector de referenciação e o fotodetector de desmodulação.

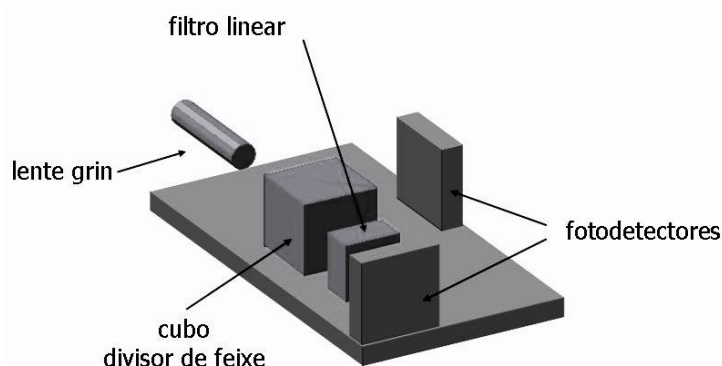


Figura 5.4 – Representação esquemática da integração de elementos micro-ópticos na constituição de filtros com resposta espectral linear.

O fotodetector de referenciação tem como função compensar as flutuações de potência óptica provocadas pela fonte de luz ou ainda por perdas ao longo das fibras ópticas de ligação. Por sua vez, o fotodetector de desmodulação integra a potência reflectida pelo sensor de Bragg após passar pelo filtro espectral, cuja resposta deste filtro, é representada na figura 5.5. A zona linear onde a desmodulação do sensor de Bragg tem o melhor desempenho está localizada na região espectral entre 1540 nm e 1552 nm.

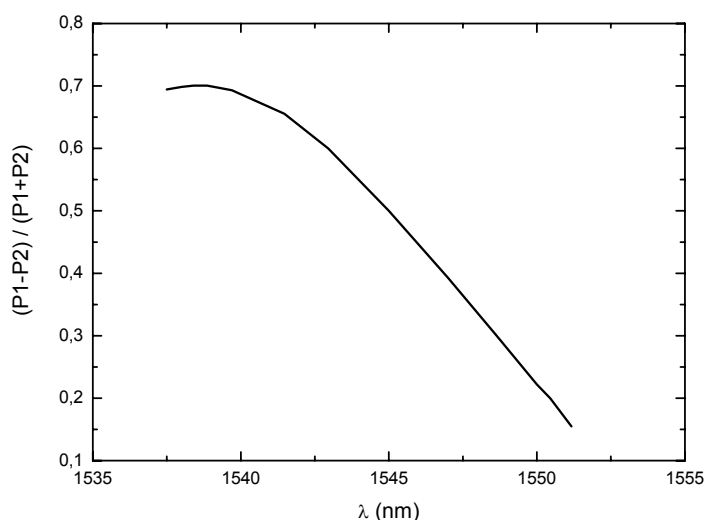
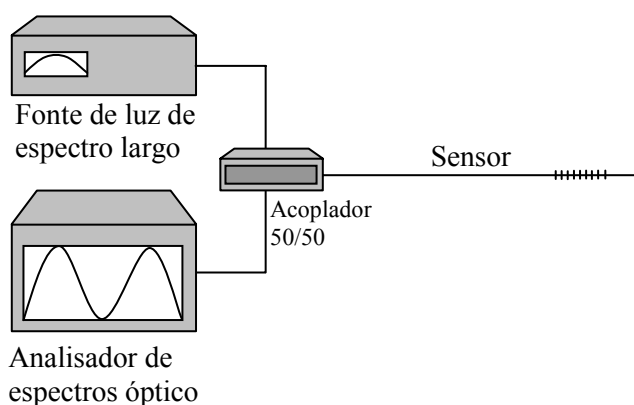


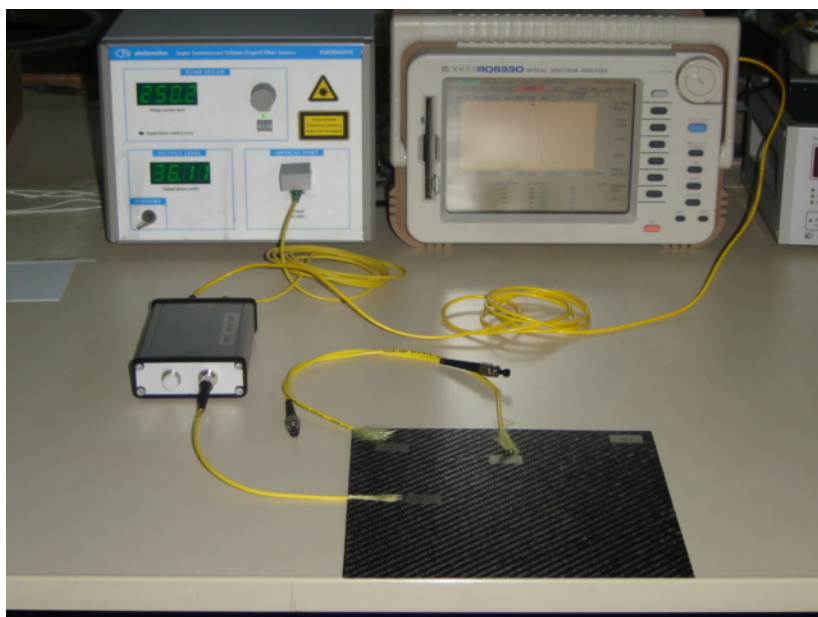
Figura 5.5 – Resposta espectral deste tipo de filtros usado para a interrogação de sensores de redes de Bragg.

O primeiro set-up usado para a interrogação de redes de Bragg, não envolveu nenhuma das unidades de medição desenvolvidas. Este set-up foi composto por uma fonte óptica de espectro largo de fibra dopada com érbio (Photonetics – Fiber White), um acoplador 50/50 e um analisador de espectros ópticos (ANDO AQ 6330 – Optical Spectrum Analyser) com uma resolução de 0,1 nm. O sistema em si é suficiente para a determinação das variações do comprimento de onda de ressonância da rede, mas tem uma grande limitação, a taxa de aquisição, que muito dificilmente se consegue baixar para além dos 1,1 Hz, mas que tendencialmente é de 1,5 Hz, aproximadamente, com aquisição e gravação. A montagem experimental apresentada na figura 5.6 é um esquema básico a partir do qual é possível efectuar a caracterização espectral e o estudo da resposta das redes de Bragg à temperatura, tensões mecânicas, etc. Em função das

evoluções do sistema conseguidas, novos esquemas para a monitorização das redes de Bragg são necessários realizar. A monitorização do sensor óptico consiste na ligação de uma fonte óptica de espectro largo a uma acoplador 50/50, estando a este ligado o sensor óptico, e saindo daqui também uma ligação para o analisador de espectros ópticos. A representação esquemática do set-up e suas conexões para a monitorização está apresentada na figura 5.6.



(a)



(b)

Figura 5.6 – (a) Esquema do primeiro set-up de monitorização de uma rede de Bragg.  
(b) Montagem experimental.

O segundo set-up envolveu a primeira geração do sistema de interrogação óptico desenvolvida, possibilitando a medição de apenas um sensor de Bragg, com taxas de aquisição de 100 Hz, ligado a um computador, para aquisição dos dados, permitindo uma maior flexibilidade de apresentação dos mesmos e posterior armazenamento. O que possibilitava analisar placas compósitas instrumentadas sujeitas a ensaios dinâmicos, caso dos ensaios de fadiga, para frequências aplicadas muito inferiores a 50 Hz. A diferença essencial em relação ao anterior set-up consiste na substituição do analisador de espectros óptico e o acoplador, por uma unidade de interrogação do sensor óptico ligado a um computador para visualização e gravação dos dados, em tempo real. O set-up implementado para esta unidade de interrogação está esquematicamente representado na figura 5.7.

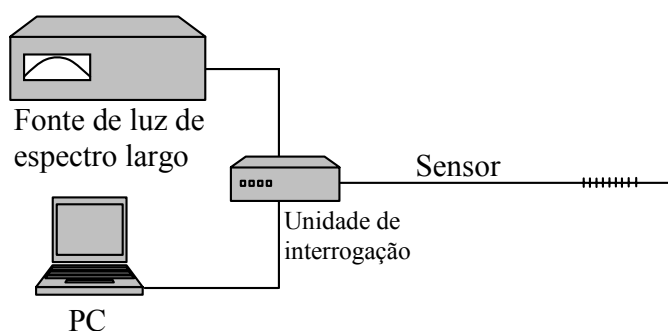
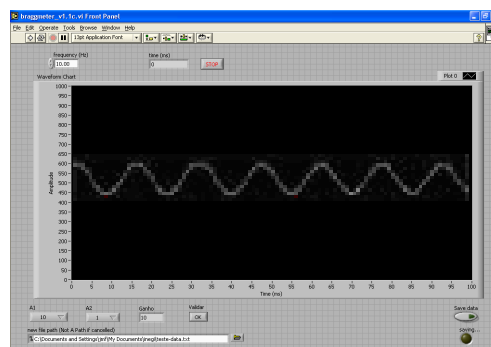


Figura 5.7 – Esquema do segundo set-up.

Esta unidade de interrogação tem a necessidade de usar uma fonte de espectro largo. A figura 5.8(a) mostra a unidade de interrogação implementada para medição de um sensor. A unidade de interrogação permite amplificar e digitalizar os sinais dos fotodetectores e comunicar com um computador via porta USB. Permite também via software de aquisição de dados, o controlo digital de ganho dos amplificadores de forma a ajustar o nível de sinal para a operação de digitalização. O painel de controlo está representado na figura 5.8(b). Este painel permite observar os dados em tempo real através de uma visualização gráfica, cuja aquisição e gestão de dados é realizada por um software compilado em LabVIEW®.



(a)



(b)

Figura 5.8 - (a) Unidade de interrogação, para um só sensor, e uma taxa de aquisição de 100 Hz. (b) Painel de controlo do software de aquisição e gestão de dados.

Apesar do sistema referido anteriormente mostrar um bom desempenho, era necessário ter um outro sistema de interrogação capaz de medir mais sensores, para aplicações que envolvessem mais do que um sensor, como é o caso da roseta óptica. Assim, a segunda geração da unidade de interrogação e medição consistiu num sistema óptico idêntico ao anterior, mas com uma ligeira melhoria na taxa de aquisição, que passou para 160 Hz, tendo também associado, um comutador em fibra óptica de quatro canais, o que permitiu medir quatro sensores de rede de Bragg multiplexados no tempo. Este sistema de monitorização à semelhança do anterior consiste de uma fonte de espectro largo ligada à unidade de interrogação e esta controlada por um computador. O set-up implementado para esta unidade de interrogação é em tudo semelhante ao anterior, mas com a possibilidade de conectar quatro sensores, figura 5.9. Com uma configuração bastante semelhante é, também, o painel de controlo do software de aquisição e gestão de dados, figura 5.10(b).

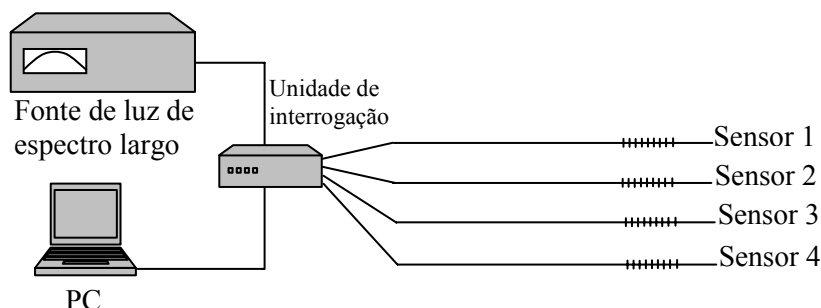
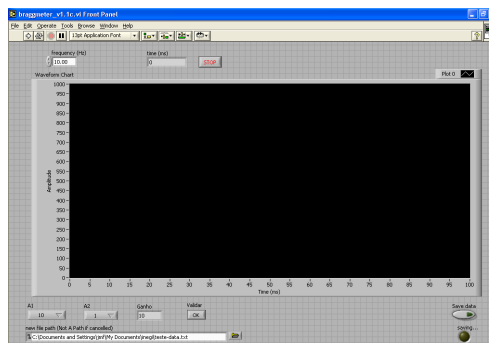


Figura 5.9 – Esquema do terceiro set-up.



(a)



(b)

Figura 5.10 – (a) Unidade de interrogação, para quatro sensores, e uma taxa de aquisição de 160 Hz. (b) Painel de controlo do software de aquisição e gestão de dados.

Numa fase mais avançada, e já na recta final deste trabalho, ainda foi possível a utilização de uma nova unidade, então desenvolvida, com a possibilidade de obtenção de uma taxa de aquisição até 30 kHz. Esta unidade é bastante mais compacta e também mais versátil, como se pode constatar pelo esquema do set-up, figura 5.11. Como se pode verificar deixa de existir todo um conjunto de equipamentos que tinham de acompanhar as realizações experimentais e necessários para a realização das medições com os sensores. A unidade de interrogação possui uma fonte de luz própria, um laser, possui também a possibilidade de interrogar vários sensores através da colocação de um comutador óptico, ou mesmo vários, nas portas de expansão que possui, figura 5.12.

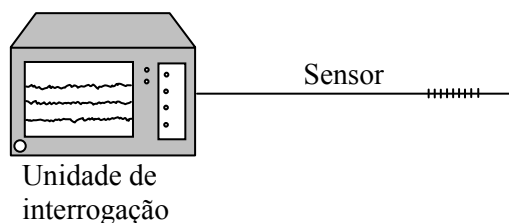
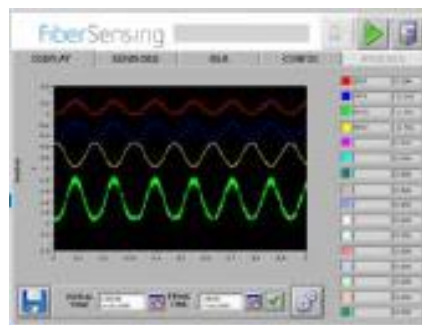


Figura 5.11 – Esquema do quarto set-up.

Na figura 5.12(b), pode-se observar a interface do sistema usado, com o utilizador, o software implementado permite de facto uma maior facilidade de utilização, quase ao nível do intuitivo, com o encadeamento de procedimentos às situações que são mais usuais.



(a)



(b)

Figura 5.12 – (a) Unidade de interrogação, com uma taxa de aquisição até 30 kHz.

(b) Painel de controlo do software de aquisição e gestão de dados.

## 5.5 – Sistema de interrogação dos sensores interferométricos

As deformações no material compósito, tanto estáticas com dinâmicas, induzem uma variação do comprimento da cavidade interferométrica, o que vai originar pequenas variações de fase. Na medição dessas pequenas variações, é fundamental fazê-lo ao longo da região linear da curva de resposta, figura 5.13, ou seja na região compreendida entre os picos e os vales, dado que permite obter a maior mudança na intensidade de luz reflectida para uma variação de fase da luz dada. Na quadratura, a relação entre a alteração de fase e a intensidade reflectida é linear.

É essencial manter o ponto de operação na quadratura para ter a máxima sensibilidade. Diferentes técnicas foram desenvolvidas para estabilizar a cavidade

interferométrica [232,233], o uso de moduladores de frequência ou de fase para a estabilização activa através do ajuste da frequência da fonte laser, por exemplo, ou a compensação da fase usando dispositivos piezoeléctricos. Recorrendo a dois sinais em quadratura de fase é possível estabilizar a interrogação do sensor interferométrico.

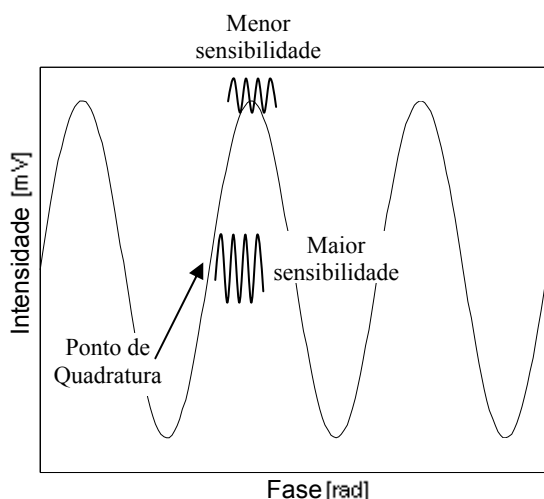


Figura 5.13 – Curva da função de transferência de um sensor em cavidade interferométrica [53].

Com a capacidade dos sensores de rede de Bragg (FBG) para seleccionar uma banda espectral, quando iluminados por uma fonte de espectro largo, estes foram utilizados para recuperar a fase, a partir de dois comprimentos de onda e com dois sinais em quadratura de fase.

A montagem experimental está representada na figura 5.14(a), que abreviadamente consiste, numa fonte de luz de banda larga, ligada ao sistema de interrogação das cavidades interferométricas, ao qual está também conectorizada a fibra óptica com a cavidade interferométrica. Do sistema de interrogação fazem parte, as redes de Bragg em fibra óptica (FBG<sub>1</sub> e FBG<sub>2</sub>), os fotodetectores (D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub>), os acopladores (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>), e o circulador.



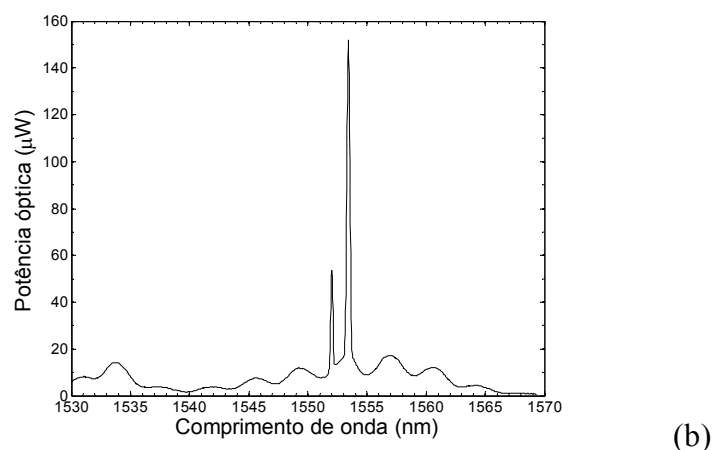
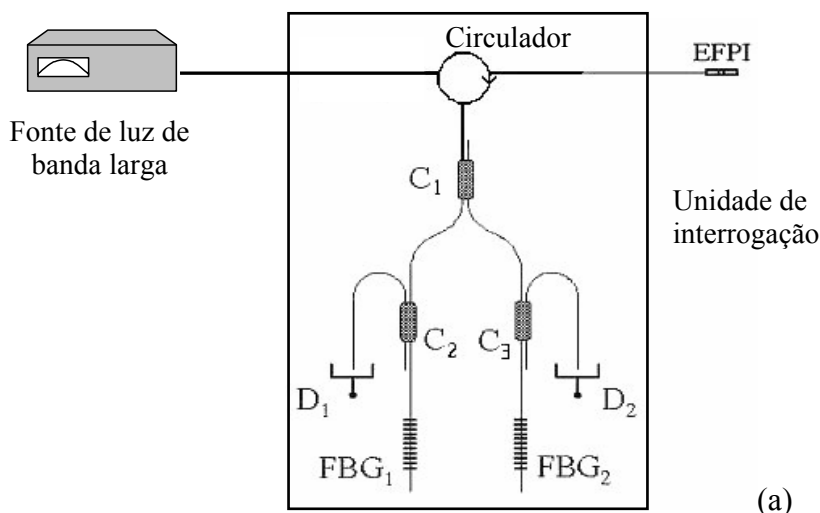


Figura 5.14 – (a) Montagem experimental para a interrogação do EFPI e  
(b) Espectro da luz reflectida pelo EFPI e os dois FBG's.

Na figura 5.14(b) está representado o espectro obtido em reflexão, por um analisador de espectros óptico, em  $C_1$ . Esta figura é obtida pela luz reflectida nas extremidades das fibras que contêm os sensores de rede de Bragg (FBG<sub>1</sub> e FBG<sub>2</sub>). A luz reflectida pelos dois sensores FBG (os dois picos) é convertida em sinais eléctricos através dos fotodetectores ( $D_1$  e  $D_2$ ).

As faixas de luz reflectidas pelos sensores de rede de Bragg, estão centradas num comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B = 2n_0\Lambda_B$ ), sendo estes escolhidos de forma a ter os dois sinais em quadratura de fase e a operar ao longo da região linear da curva de resposta.

Assim a fase,  $\delta$ , é obtida a partir da equação [234]:

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{v_2 - V_2}{v_1 - V_1} \right) \quad (5.4)$$

em que  $V_{1,2}$  são as tensões eléctricas constantes e dependentes da potência óptica e do ganho do detector,  $v_1$  e  $v_2$  as tensões de saída nos fotodíodos.

No trabalho que envolveu este sistema de interrogação, limitou-se a recuperar a informação de um dos dois fotodetectores, por só se ter um à disposição, o que não foi considerada uma limitação tendo em conta o objectivo do trabalho com este sensor, ou seja a integridade do seu embebimento. Como consequência as respostas do sensor interferométrico estão apresentadas em volts. No entanto, o processo para obter os valores de deformação é relativamente simples [235].

Os sinais à saída do fotodetector da JDS Uniphase, foram digitalizados por um osciloscópio da Tektronix TS200, controlado por computador com o software LabVIEW<sup>TM</sup> e através de uma interface GPIB (IEEE488.2).

# Capítulo 6

## 6 – Embebimento de sensores ópticos em compósitos laminados

### 6.1 – Introdução

A investigação e desenvolvimento dos materiais compósitos laminados com os sensores embebidos tem sido objecto de uma crescente evolução, demonstrando que o conceito de estruturas compósitas inteligentes está em expansão e em áreas de actuação muito diferenciadas [236-240]. O desenvolvimento destas estruturas envolve a integração de sensores, nomeadamente os sensores em fibra óptica, possibilitando que estes materiais avançados possuam uma monitorização de integridade permanente, ou seja, desde o processo de fabrico, passando pela sua implementação, e durante todo o seu tempo de vida útil, em particular em estruturas de grande porte.

A alteração da metodologia de produção levou à obtenção de placas sensoras em material compósito, com espessuras na ordem dos 400  $\mu\text{m}$  para uma placa laminada em fibra de carbono/epóxico, de 350  $\mu\text{m}$  de espessura para uma placa laminada em fibra de vidro/epóxico e, com uma espessura de 500  $\mu\text{m}$ , uma placa sensora em resina de

epóxico. Foi efectuada a verificação da qualidade obtida no embebimento da fibra óptica através de observações por microscópio óptico, mas também através do comportamento espectral das redes de Bragg, antes e após a produção de algumas das placas, evidenciando as ligeiras alterações introduzidas na metodologia de produção de placas laminadas.

### **6.1.1 – A escolha do material**

Os materiais para a realização deste trabalho foram seleccionados, tendo-se em atenção a maior facilidade na reprodutibilidade das placas sensoras, sempre que tal fosse necessário. A sua escolha foi um processo natural, dado que são os materiais mais usados nas mais diversas áreas de aplicação, e em áreas de grande exigência, tal como na aeronáutica, assim como nos desportos de alta competição. Esses materiais são, também, os que, ultimamente, têm sido mais usados em aplicações com fibras ópticas, ou seja, os pré-impregnados.

A razão do pré-impregnado prende-se, essencialmente, com o facto de a resina estar bem “perfeitamente” distribuída pelo material, de forma mais uniforme do que aquela que se conseguiria se o trabalho fosse realizado por impregnação manual do tecido. Com o material escolhido, garante-se não só um trabalho mais limpo, porque não é necessário misturar componentes cada vez que se realiza uma placa sensora, mas também obtém-se uma maior facilidade na reprodutibilidade das placas sensoras, e também no manuseamento das fibras ópticas na altura de produção. Assim, não é necessário ter uma demasiada atenção as condições de temperatura e humidade na fase de realização das placas.

Os materiais pré-impregnados encontram-se armazenados em rolos de várias dezenas de metros, sendo mantidos a temperaturas negativas (-18 °C) durante essa fase, sendo removidos apenas algumas horas antes da fase de produção, mantendo, assim, as suas propriedades por um longo período de tempo.

Os materiais compósitos a seguir descritos e utilizados na realização deste trabalho consistiram nas configurações de tecido. O mais utilizado é conhecido como tecido “twill” 2/2 de fibra de carbono de elevada resistência, impregnado com resina de epóxico, CC206 ET442. Uma outra configuração foi o tafetá, em fibra de carbono de elevada resistência, impregnado com resina de epóxico, CC160 ET442. Com a mesma configuração de tecido, usou-se também uma de fibra de vidro E (elevada resistência), impregnada com resina de epóxico, EE190 ET442. E também foi usado um tecido com uma configuração unidireccional, em fibra de carbono de elevada resistência, impregnado com resina de epóxico modificada, HS 160 REM. Todos os materiais foram fornecidos pela SEAL.

Na escolha dos materiais podia-se, eventualmente, ter envolvido outro tipo de material, com uma gramagem maior, mas teria como consequência imediata o aumento da espessura final. Assim, as placas sensoras ficariam mais espessas, tendo em atenção que um dos objectivos era criar placas sensoras que pudessem ser usadas como elemento sensor numa determinada estrutura e, não serem mais um elemento de reforço da mesma, como se viria a verificar posteriormente num ensaio realizado. Assim, a grande preocupação que assistiu esta realização foi obter placas sensoras finas, e não um elemento de reforço localizado na estrutura a monitorizar.

## 6.2 – Procedimento experimental

A maioria dos provetes realizados neste trabalho foram obtidos a partir de fibra de carbono pré-impregnada com resina de epóxico em que o tecido tem uma configuração designada por “twill” 2/2, ou seja, o material apresenta as mesmas características a 0° e 90°. Uma amostra deste material pode ser vista na figura 6.1(a). Produziram-se provetes com duas camadas, tal como se mostra na figura 6.1(b), dispostas tanto quanto possível, de forma que, tanto a teia e por conseguinte a trama, possuissem a mesma disposição de orientação do entrelaçado da fibra de carbono entre as diferentes camadas aplicadas. Daí resultaram placas com uma espessura de 400 µm, aproximadamente.

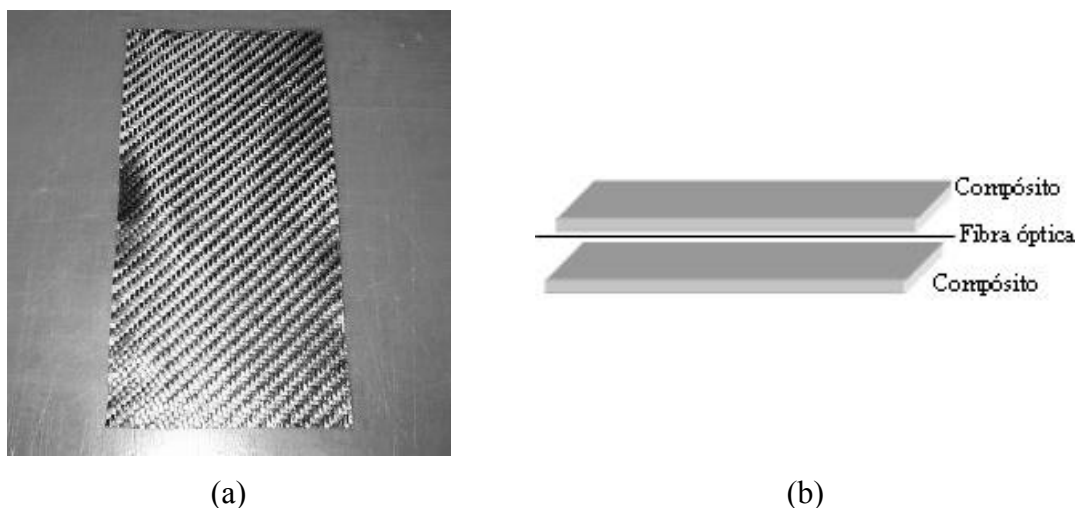


Figura 6.1 – (a) Tecido de fibra de carbono usada, com a configuração de “twill” 2/2.  
(b) Esquema do empilhamento nas amostras, com a fibra óptica entre camadas.

A fibra óptica foi colocada manualmente, entre as camadas de material compósito, conforme mostra a figura 6.1(b), tentando sempre que a mesma fosse alinhada com uma teia. A fibra óptica usada tem um diâmetro total de 250  $\mu\text{m}$ .

Os processos de fabrico das amostras são os usualmente praticados em aplicações de estruturas usadas na indústria aeronáutica, respeitando as recomendações do ciclo de produção, feitas pelo fabricante do material pré-impregnado. Assim, na produção das amostras com a utilização de saco de vácuo em autoclave, e também na prensa de pratos quentes, o material foi aquecido até aos 130°C, com uma velocidade de aquecimento de 4 °C/min.

No autoclave, e após o fecho do saco de vácuo foi aplicada uma pressão de  $0,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  (0,5 bar), e quando a temperatura de 130 °C foi atingida, aumentou-se essa pressão para  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  (2 bar), a qual foi mantida juntamente com a temperatura por mais uma hora, ao fim da qual, deixou-se arrefecer até á temperatura ambiente, mas sob pressão. Na prensa, a situação é algo semelhante, ao fechar os pratos aplica-se uma pressão de  $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  (1 bar), no manómetro, uma vez atingida a temperatura dos 130 °C, é então aplicada uma pressão de  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  (2 bar). Mantém-se a pressão e a temperatura durante uma hora e, em seguida, abrem-se os pratos e remove-se o material. Houve no entanto, a necessidade de alterar ligeiramente esta parte do ciclo, no sentido

de se efectuar o arrefecimento, com o material sob pressão, e só então remover. Todo o processo de produção dos provetes respeitou basicamente o esquema que se apresenta na figura 6.2.

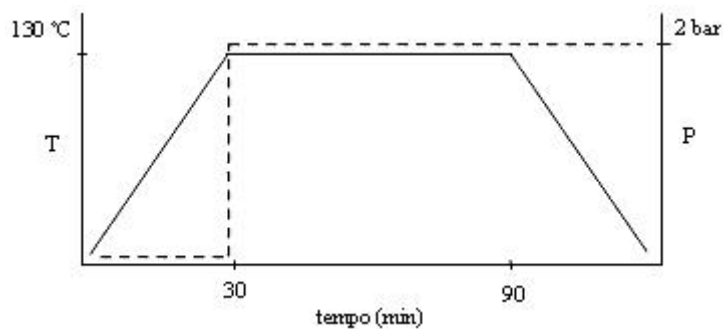


Figura 6.2 – Diagrama de temperatura e de pressão, usado na fabricação dos provetes.

O fabrico dos provetes em saco de vácuo no autoclave, foi realizado no equipamento, apresentado na figura 6.3(a). Este equipamento permite controlar a pressão de vácuo, a temperatura e a pressão no ambiente da cuba. A produção na prensa de pratos quentes foi realizada no equipamento que se apresenta na figura 6.3(b), o qual permite o controlo de pressão dos pratos, além da temperatura dos mesmos sobre a amostra.



(a)



(b)

Figura 6.3 – (a) Fabrico de provetes por autoclave. (b) Fabrico de provetes por prensa de pratos quentes.

Após a produção, os provetes foram cortados em diferentes zonas, no sentido de se obter uma amostragem representativa do estado de embebimento conseguido pelos métodos de produção. Assim, efectuaram-se cortes perpendiculares à colocação da fibra óptica, de forma a retirar uma pequena parte para observação em microscópio óptico. Estes cortes foram realizados perpendicularmente ao plano de empilhamento. Pretendeu-se verificar o estado e a compactação das amostras, bem como a qualidade do embebimento conseguido com a fibra óptica.

### **6.3 – Evolução dos embebimentos**

A análise da qualidade do embebimento foi realizada com recurso a um microscópio óptico. No entanto, antes de se poder efectuar essa observação houve a necessidade de preparar as amostras através do polimento das superfícies. Para isso recorreu-se a lixa de água, iniciando o desbaste com uma granulação grande e, progressivamente, foi-se diminuindo essa granulação, até a um estado de visualização tal que permitisse verificar a qualidade dos embebimentos.

O trabalho de preparação de amostras requer algum cuidado, para não danificá-las, uma vez que o excesso da acção abrasiva pode ser destruidora para a matriz de resina, tal como indiciam algumas das observações realizadas, verificando-se falta de resina principalmente com uma determinada orientação, o que faz pensar, quer no disco a diamantado usado no corte das amostras, que é bastante abrasivo, mas também na acção de desbaste com as diferentes lixas de água, e o movimento rotativo da máquina a provocar a remoção da resina que eventualmente estivesse mais fragilizada pela acção do disco de corte.

É de referir que o processo descrito anteriormente podia ter sido realizado com outro tipo de máquinas, quer no corte, com velocidade angular superior e equipada com um disco de corte mais fino, quer na máquina de desbaste com recurso a pasta de diamante, no sentido de se obter uma melhor visualização da metodologia de produção



cujos resultados do embebimento das fibras ópticas em placas finas compósitas fossem os mais eficazes possível. Como se poderá verificar nos pontos seguintes, com algumas fotografias a mostrarem riscos provenientes da acção de desbaste. Com a alternância entre a produção e a visualização microscópica, este processo foi moroso envolvendo várias realizações experimentais até se obter um bom resultado.

Desde as primeiras placas produzidas por autoclave e pela prensa de pratos quentes, que o aspecto geral dos laminados obtidos tem a configuração que se apresenta na figura 6.4, num plano transversal ao plano de empilhamento, e numa zona que não contém fibra óptica, na qual é perfeitamente identificável a disposição das fibras de reforço, que compõem a trama e as fibras que compõem a teia. É possível observar o cruzamento do entrelaçado do tecido, além da boa compactação obtida.

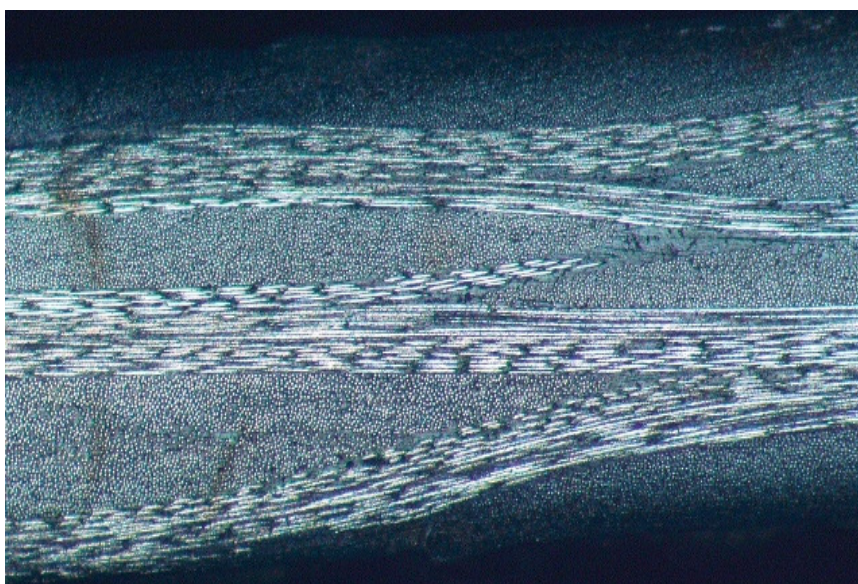


Figura 6.4 – Aspecto geral das amostras produzidas, fora da zona da fibra óptica.

Na zona junto da fibra óptica, em muitas das observações realizadas, verifica-se que o material envolvente é essencialmente a resina, principalmente quando a fibra óptica se acomodou muito próximo da zona de cruzamento entre a teia e a trama. A zona do embebimento tem um aspecto bastante diferente da restante amostra, tal como se verifica pela figura 6.5 e figura 6.6. A qualidade do embebimento obtida nesta fase da fabricação não era de facto muito boa.

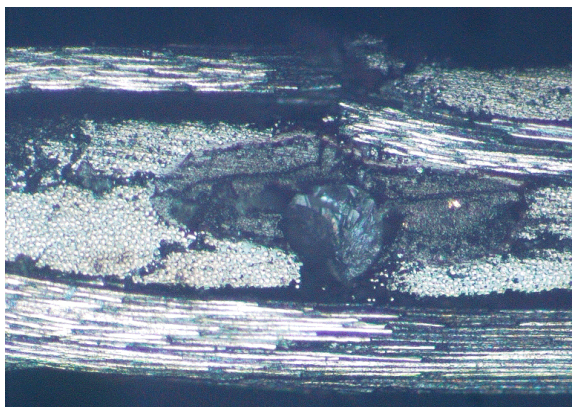


Figura 6.5 – Amostra obtida por prensa de pratos quentes.

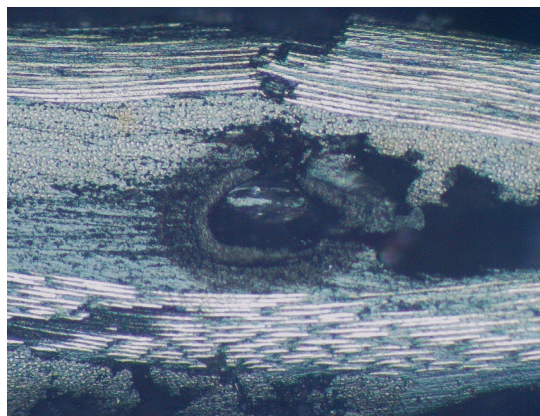


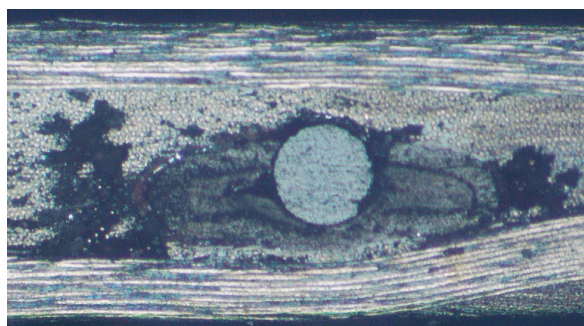
Figura 6.6 – Amostra obtida por autoclave.

Nas amostras apresentadas nas figuras anteriores, não foi possível obter qualquer espectro óptico das redes de Bragg, muito possivelmente porque ocorreu rotura da fibra óptica no interior do material compósito. Verifica-se, também, em alguns casos a rotura completa do revestimento. Observa-se mesmo uma rotura nas próprias fibras de reforço. No entanto, não foi possível determinar se estas não terão ocorrido durante a fase de corte e preparação das amostras para a análise ao microscópio, em função das tensões possivelmente acumuladas, pois numa análise visual às amostras após a produção não era possível observar tal comportamento. Como resultado, houve necessidade de alterar a metodologia do processo de embebimento.

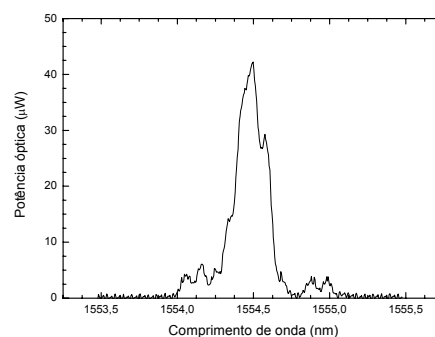
As fibras ópticas incorporadas nas estruturas compósitas laminadas são de uma ordem de grandeza muito superior às fibras de carbono, habitualmente usadas no fabrico de compósitos. De facto, enquanto as fibras ópticas apresentam um diâmetro na ordem dos 250  $\mu\text{m}$ , as fibras de carbono utilizadas no pré-impregnado possuem um diâmetro individual aproximadamente de 10  $\mu\text{m}$ . Esta diferença de grandeza de diâmetros é razão suficiente para introduzir alguma perturbação nos provetes, principalmente naqueles que têm uma pequena espessura. Uma vez que há menores quantidades de fibra de reforço, poderão surgir zonas mais ricas em resina e com menos fibras de reforço, em torno da fibra óptica.

Após uma pequena redução da temperatura máxima atingida na fabricação das placas laminadas, que agora se estabeleceu nos 125 °C, verificaram-se algumas

melhorias no embebimento. Deixaram de surgir fibras de reforço quebradas, muito possivelmente também pela redução das tensões acumuladas naquela zona. No entanto, o revestimento da fibra óptica ainda foi destruído, embora a fibra óptica em si apresentasse bom aspecto. Esse facto é traduzido pelos espectros ópticos obtidos da reflexão da rede de Bragg. Embora estes não sendo muito bons, observou-se, no entanto, um sinal mostrando que a fibra estava “viva” no interior das placas de material compósito (figura 6.7). O aspecto do embebimento conseguido era agora mais semelhante para ambos os processos de fabricação.



(a)



(b)

Figura 6.7 – (a) Amostra com o revestimento destruído. (b) Espectro óptico obtido pelo sensor embebido.

Nesta fase, verificou-se que, sendo o aspecto do embebimento semelhante para ambos os processos de fabricação, foi observado que o método de produção usado alterou a forma como a luz se propaga na fibra embebida. Isto pode ser comprovado pelos resultados obtidos nas medições feitas à transmissão de luz na fibra óptica que se encontrava embebida no material compósito, tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores da transmissão óptica nas fibras após cura.

| <b>Produção</b>  | <b>Perdas por Transmissão (%)</b> |
|------------------|-----------------------------------|
| <b>Autoclave</b> | 1 – 5                             |
| <b>Prensa</b>    | 35                                |



Verificou-se uma perda significativa da luz transmitida nas amostras que foram realizadas na prensa de pratos quentes. No entanto, uma possível explicação para as diferenças serem tão acentuadas poderá estar no facto da fibra óptica, em amostras obtidas por autoclave estarem mais “soltas”, isto é, o saco de vácuo faz uma pressão sobre todo o material de igual forma em qualquer ponto, moldando-se às necessidades de espaço e forma que o mesmo possa ter. Na prensa de pratos quentes, isso não acontece, dado que todo o material terá que ficar compactado entre as duas superfícies paralelas, que são os dois pratos.

Em determinadas amostras, nesta fase inicial do trabalho, foi frequente observar a forma de um olho em volta da fibra óptica. Provavelmente, a origem deste fenómeno deve-se às características da protecção da fibra óptica. Isto é, as observações indicam que muito possivelmente o revestimento que a fibra óptica possui seja mais vulnerável ao ciclo de temperatura e pressão envolvidos na fabricação das placas laminadas, durante um período de tempo de uma hora. No entanto, seria de esperar que mesmo a essa temperatura o revestimento da fibra resistisse, dado que o tempo de exposição não é muito elevado. Esta situação não ocorreu em todas as amostras observadas, mas só em algumas. A observação referida também ocorreu em amostras com mais de duas camadas de material compósito, como se mostra na figura 6.8.

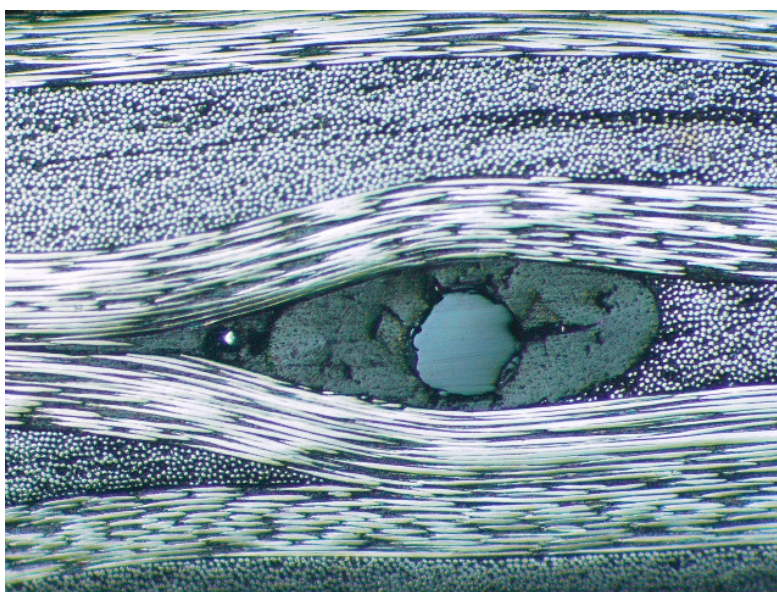


Figura 6.8 – Deformação em forma de olho da protecção exterior da fibra óptica.

O aparecimento da forma de olho, em volta da fibra óptica, quando embebida em placas laminadas, pode estar relacionado com a pressão exercida sobre as camadas de material compósito, logo no início do ciclo de produção, mas também pelo facto de estas serem muito finas. Associando isso ao ciclo da temperatura aplicado, podemos ter um conjunto de factores que ocasionem o fenómeno observado. Motivo pelo qual, deu-se início novamente, a uma pequena alteração da metodologia de produção das placas.

No entanto, a utilização de uma película protectora de alumínio, ou mesmo de prata, ou até de ouro, em volta da fibra óptica, possibilitaria dessa forma atingir temperaturas de cura do compósito muito superiores e, assim, possivelmente manter integra a fibra óptica.

No sentido de melhorar o embebimento observado anteriormente, foi então alterado o procedimento de fabricação de placas laminadas. Um dos primeiros passos foi manter a redução da temperatura máxima a atingir no ciclo, que agora não passou dos 125 °C. O passo seguinte consistiu na redução da pressão inicial aplicada, durante o tempo que decorre até se atingir a temperatura máxima, uma vez esta atingida, aplicou-se a pressão final. A pressão inicial no saco de vácuo dentro do autoclave foi de  $0,3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> (0,3 bar). Na prensa foi ligeiramente diferente, a pressão inicial dos pratos é só uma pressão de contacto, até se atingir a temperatura máxima, ao fim da qual foi então aplicada a pressão de  $2 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> (2 bar). O restante processo do ciclo é feito normalmente. A figura 6.9 mostra uma das placas obtidas após aplicadas estas alterações. A ausência de resina junto da fibra óptica foi em parte provocada por arrancamento da lâmina de corte, e também pelo processo de polimento.

Como se pode observar, a fibra óptica conjuntamente com o revestimento não sofreu qualquer alteração de forma. Este estado de embebimento permitiu obter alguns resultados satisfatórios, mas não na totalidade, dado que, o espectro óptico em reflexão obtido ainda se apresenta deformado. A alteração registada é descrita na bibliografia como sendo devido à birrefringência [177-179]. Em que uma das possíveis situações que lhe pode dar origem é precisamente a pressão, tal como ela aqui acontece. Ou seja, uma pressão efectuada entre dois planos paralelos, entre os quais se encontra a fibra óptica.

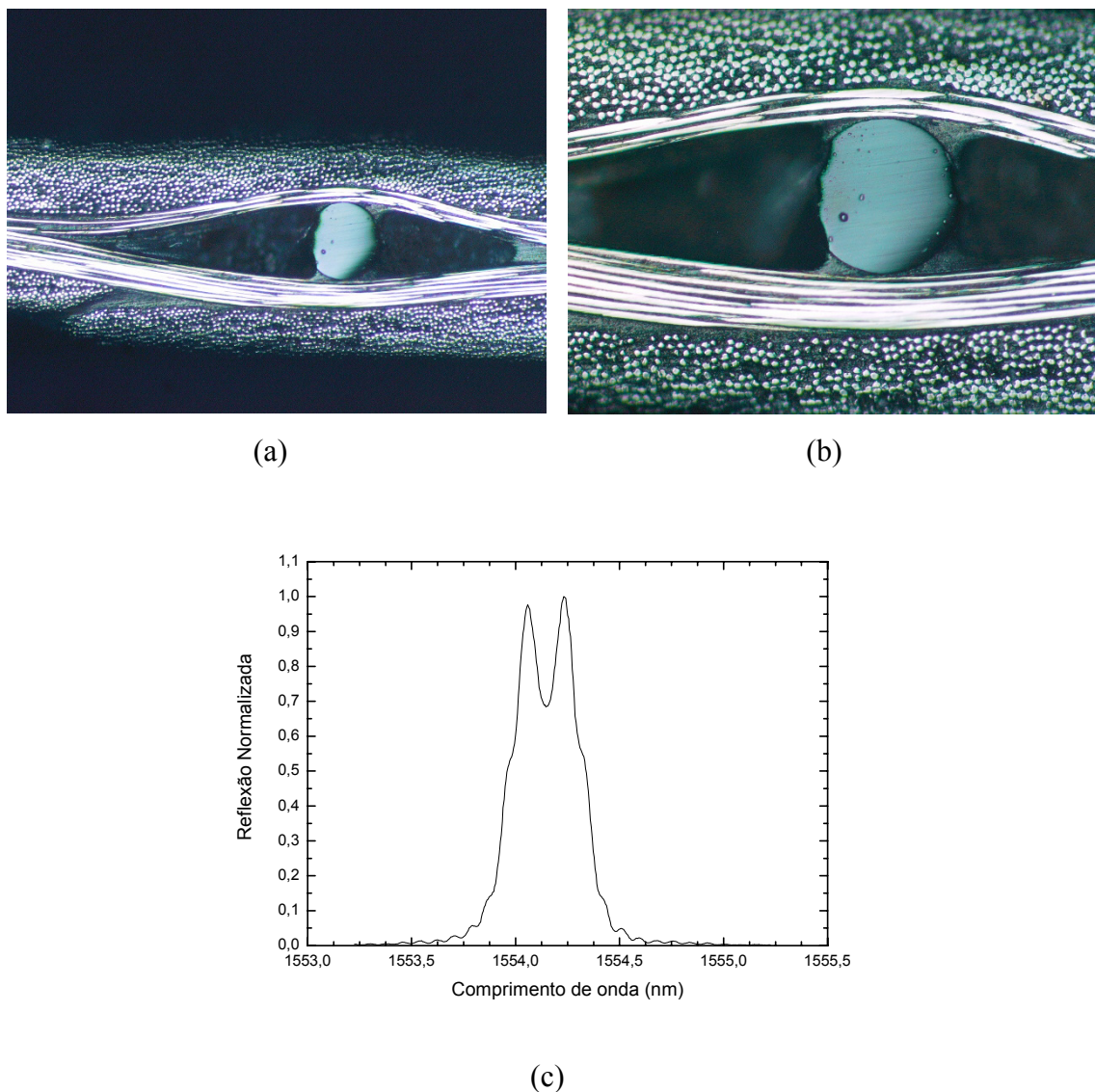


Figura 6.9 – (a), (b) Embebimento da fibra óptica numa placa laminada. (c) Espectro óptico obtido pelo sensor embebido.

Em função dos resultados obtidos, alterou-se, mais uma vez, a metodologia do processo de embebimento. Esse foi conseguido por aplicação das alterações já anteriormente realizadas, acrescentando um novo factor. Tal consiste na aplicação de uma pré-tensão permanente à fibra óptica, durante todo o processo de fabricação das placas laminadas. A tensão imposta é quantificada graficamente, provocando um deslocamento de 1 nm, no pico do espectro de reflexão da rede. Este procedimento permitiu obter os resultados apresentados na figura 6.10.

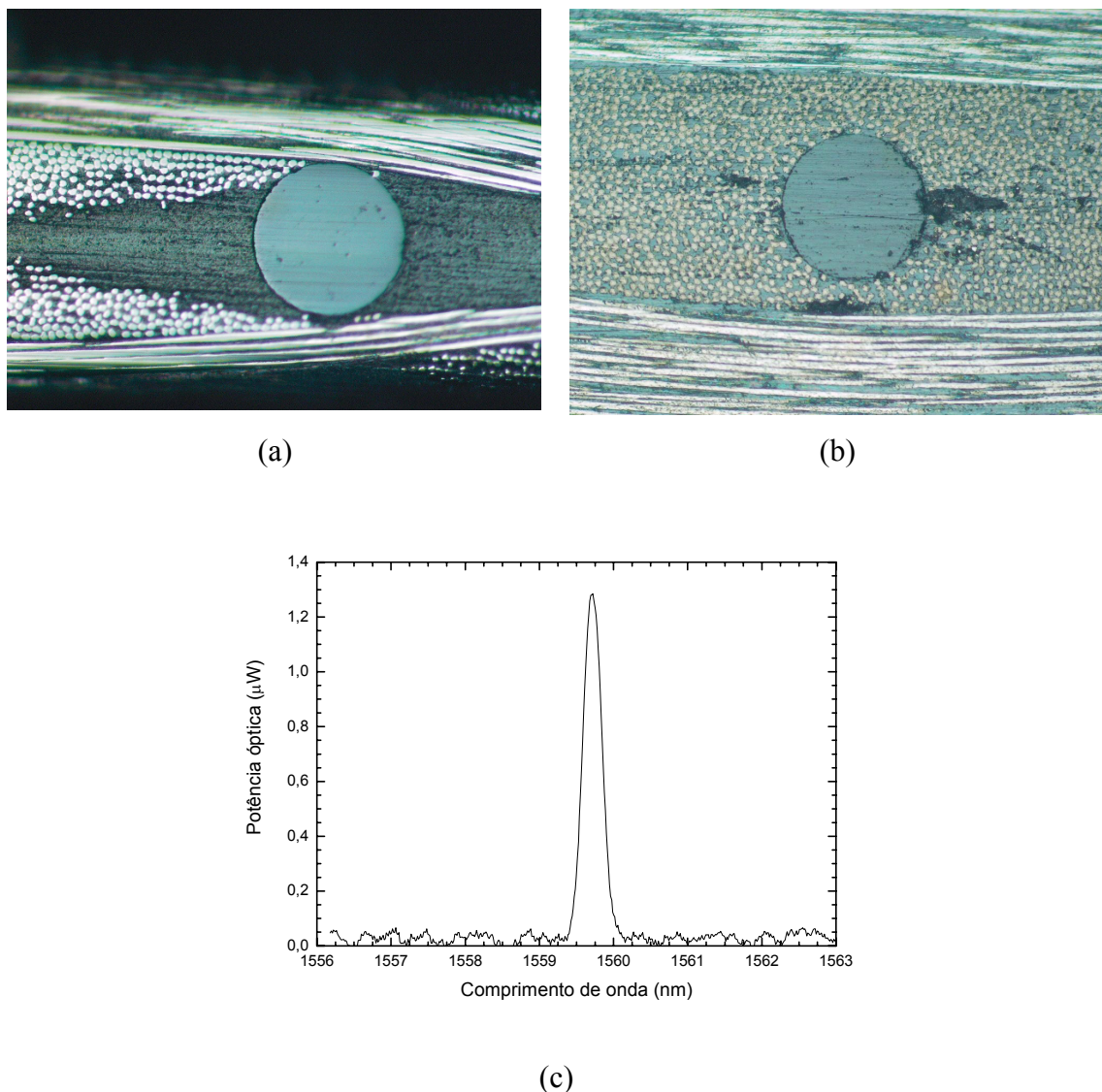


Figura 6.10 – (a) e (b) Fibras ópticas embebidas em placas laminadas. (c) Espectro óptico obtido pelo sensor embebido na mostra (a).

A alteração de metodologia de fabrico das placas teve como resultado um embebimento mais eficaz, com a obtenção de espectros ópticos em reflexão praticamente limpos, possibilitando obter placas sensoras em laminados de compósito, tendo estas sido sujeitas a alguns ensaios mecânicos, de forma a verificar o comportamento dos sensores a solicitações tanto estáticas como dinâmicas.

As alterações introduzidas com a redução da temperatura máxima, tiveram como objectivo reduzir o gradiente de temperatura suportada em contínuo pela fibra óptica e a temperatura atingida durante o fabrico da placa compósita.

Com a redução da temperatura, observou-se em microscópio óptico que, em alguns dos revestimentos das fibras ópticas, se tinha apenas uma secção oval, sem a ocorrência da qualquer destruição da sua parte. No entanto, só com esta alteração, não iria ter o efeito pretendido.

Por conseguinte, alterou-se a pressão, com o intuito de também reduzir os efeitos do impacto inicial, que ocorre entre o material compósito e a fibra óptica. O que nesta fase inicial poderíamos ter situações de pequenos esmagamentos localizados, devido ao entrelaçamento da manta de tecido usado. Os resultados, como anteriormente já se referiu, resultaram na ausência de luz na outra extremidade da fibra óptica. Situação que se agrava com a fibra óptica sem revestimento, na zona da rede de Bragg, logo mais sensível às interacções com o material envolvente. Daí que, se o material envolvente estiver mais moldável, e o impacto inicial for menor, torna o processo mais eficaz.

Por seu lado, com uma pré-tensão na fibra óptica, permite que esta esteja sempre na mesma posição durante a fase inicial do embebimento, fazendo com que as fibras de reforço se acomodem melhor à sua volta, uma vez que estas estão mais maleáveis assim como a resina, contornando-a sem realizarem uma grande pressão transversal, e por conseguinte obter um embebimento das redes de Bragg mais eficiente, principalmente no que toca ao comportamento do espectro reflectido pela rede de Bragg.

## **6.4 – A variação de $\lambda_B$ durante a produção da placa laminada**

Foi possível monitorizar um dos sensores em rede de Bragg durante a produção de uma placa sensora laminada. O sensor tem uma ressonância de Bragg à volta de 1550 nm. Depois de montada a placa conforme se indicou na figura 6.1, foi colocada na prensa de pratos quentes, pois no autoclave não foi possível fazer passar um cabo de fibra óptica para o exterior, para posterior monitorização do sensor. A interrogação e leitura da fibra óptica foram efectuadas com o auxílio do segundo set-up, anteriormente



referido no capítulo 5. A observação da variação do  $\lambda_B$  foi efectuada desde que se deu início à subida da temperatura até à prensa atingir novamente a temperatura ambiente. Essa variação é apresentada na figura 6.11.

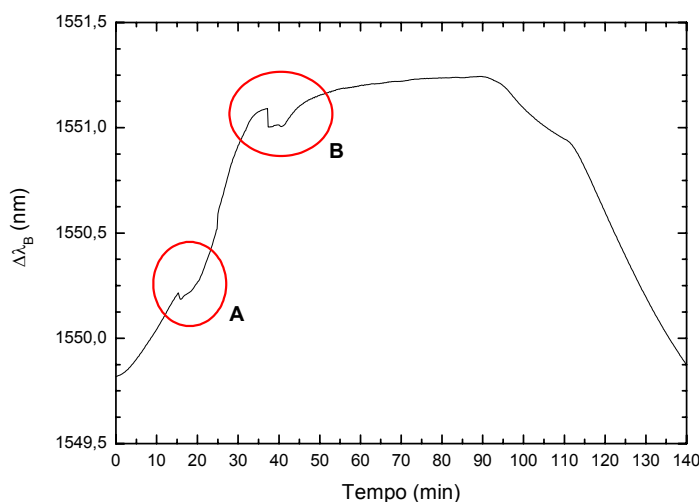


Figura 6.11 – Variação do  $\lambda_B$ , durante a produção da placa laminada.

Nesta observação é possível verificar dois acontecimentos distintos. O primeiro ocorre a uma temperatura aproximada dos 65 °C, círculo A. E que provavelmente se deve ao acomodar da fibra óptica em relação às fibras de reforço, denotando um certo relaxamento de algumas tensões provocadas quando fecha a prensa, dado que a esta temperatura o material deve estar já mais “pastoso”. E a zona B, ocorre quando a prensa tenta estabilizar a temperatura, ao que posteriormente se dá início ao estado de endurecimento e consolidação da resina, a cura propriamente dita.

## 6.5 – O efeito do revestimento no sensor

O embebimento de sensores de rede de Bragg em materiais compósitos pode resultar numa não-uniformidade do campo de deformação na zona do sensor, levando à distorção do espectro de reflexão. A orientação do sensor óptico em função das fibras

do reforço adjacentes pode influenciar o perfil do espectro do sensor. No entanto, a distorção do espectro pode também ocorrer como resultado de algumas tensões residuais geradas durante o processo de fabricação, levando a uma assimetria da carga no sensor, o que pode resultar na deformação do espectro de reflexão, e causar leituras erradas do mesmo [241]. Tendo em atenção a influência do campo de deformação nos espectros de reflexão dos sensores, pelo embebimento destes sem revestimento, foram efectuadas algumas observações ao comportamento de alguns sensores com e sem revestimento.

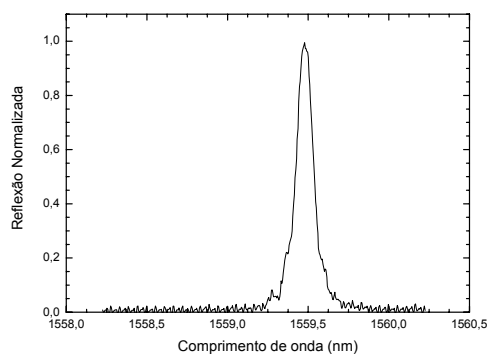
Na última fase de alteração da metodologia de fabrico foi considerado adequado verificar qual seria o comportamento dos sensores com revestimento na zona da rede de Bragg. O material utilizado nesse revestimento é semelhante ao empregue na protecção da fibra óptica. Assim, após alguns embebimentos com sensores revestidos e outros sem revestimento, observou-se a resposta destes, quando colocados entre camadas de carbono. Depois de empilhadas e montadas as placas de material compósito com o respectivo sensor, o conjunto foi curado em saco de vácuo no autoclave. Para tal, efectuaram-se alguns registos qualitativos do comportamento desses sensores. Na tabela 6.2, resume-se a qualidade dos embebimentos das redes de Bragg, para as diferentes configurações.

Tabela 6.2 – Condição da rede de Bragg quando embebida no compósito laminado.

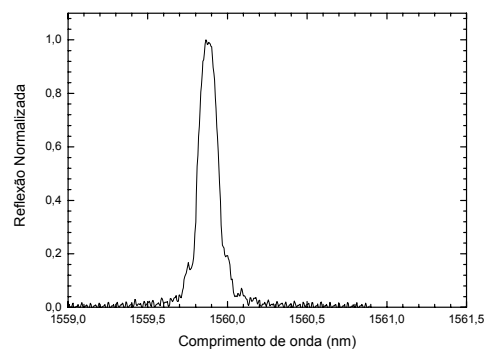
| Rede de Bragg na direcção da teia |                  | Rede de Bragg a 45° com a teia |                  |
|-----------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| Com Revestimento                  | Sem Revestimento | Com Revestimento               | Sem revestimento |
| Bom                               | Aceitável        | Bom                            | Aceitável        |

Verificou-se a variação do comprimento de onda no espectro reflectido, em função do revestimento do sensor. Observam-se algumas diferenças que podem depender da orientação e localização da fibra óptica em relação à orientação do reforço do compósito e à presença ou ausência do revestimento na zona do sensor. As condições de cura podem também ser um elemento de potencial influência.

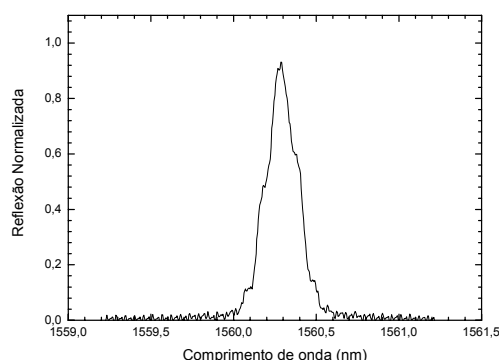
O resultado do procedimento anterior, para algumas das configurações mais usadas neste trabalho, pode ser visto nas figuras 6.12, com os espectros ópticos em reflexão pelas redes de Bragg.



(a) Espectro do sensor antes do embebimento



(b) Espectro do sensor com revestimento.



(c) Espectro do sensor sem revestimento.

Figura 6.12 – Espectros em reflexão das redes de Bragg.

Quando as redes de Bragg são revestidas obtêm-se uma boa resposta nos espectros em reflexão ópticos, mantendo a mesma forma após o embebimento. As movimentações da posição dos centros dos comprimentos de onda resultam, essencialmente, das tensões internas no material compósito durante a cura. Observa-se também uma maior deformação do espectro óptico obtido no sensor sem revestimento, possivelmente, devido à maior sensibilidade deste às referidas tensões internas. No entanto, com a

aplicação de uma tensão na fibra óptica e, por conseguinte, no sensor, durante a fabricação das placas laminadas, denota-se que este consegue apresentar um comportamento muito semelhante ao sensor com revestimento. Razão pela qual, se passou a produzir as placas compósitas laminadas com sensores ópticos embebidos, sem revestimento na zona do sensor, dado que a metodologia de produção implementada permite obter bons resultados. Assim, salvo necessidades especiais de aplicação, não foi necessário utilizar qualquer revestimento na zona do sensor.

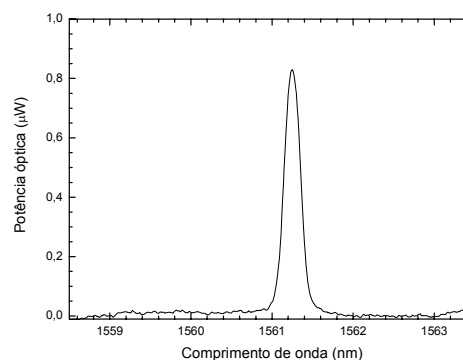
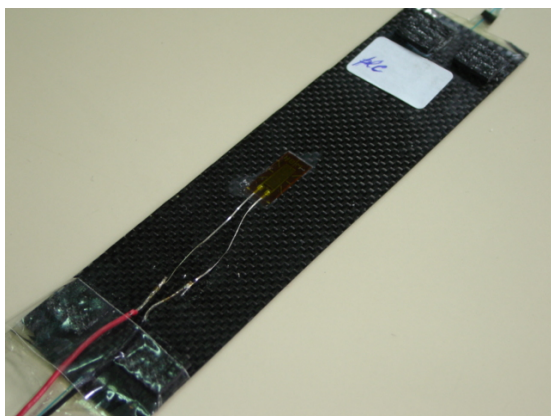
## **6.6 – Exemplo de embebimentos obtidos nos materiais compósitos**

Neste ponto apresentam-se alguns dos resultados do processo de embebimento dos sensores ópticos, assim como a integridade dos mesmos, uma vez embebidos nos laminados em materiais compósitos. Estas são apenas uma amostra de um conjunto de placas realizadas, dado que a apresentação de todas elas, além de muitas delas serem iguais ou semelhantes, tornaria a sua exposição demasiado fastidiosa. Além das placas laminadas, foram também efectuadas algumas experiências envolvendo estruturas sanduíche obtidas por RTM.

### **Placas laminadas**

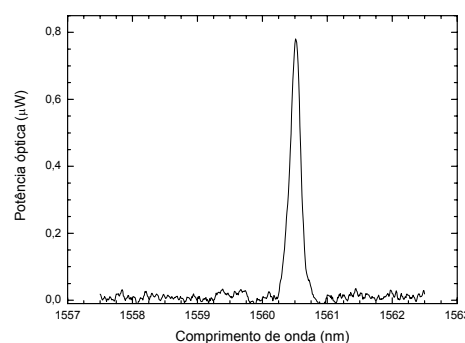
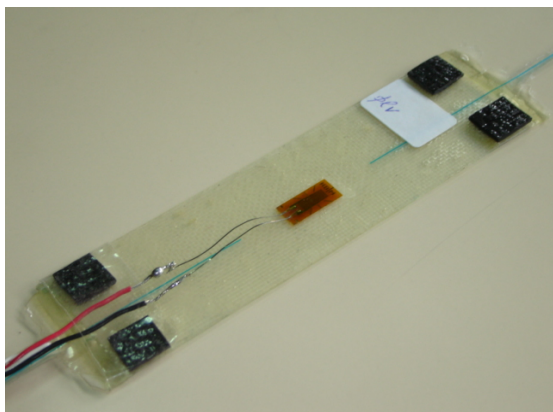
Na figura 6.13(a) apresenta-se uma placa sensora obtida em fibra de carbono/epóxico. A fibra óptica encontra-se posicionada no meio da placa, entre as camadas de compósito. Na figura 6.13(b), pode-se observar o espectro óptico em reflexão da rede de Bragg embebida. Como se pode verificar, pelo espectro obtido, a fibra óptica, e mais concretamente a zona do sensor, parecem demonstrar uma boa qualidade do embebimento. E isso foi verificado, aplicando uma tensão manualmente ao longo da direcção da fibra óptica, observou-se que o pico do espectro se deslocava progressivamente no sentido dos comprimentos de onda superiores, e o contrário também foi observado, isto é, com a aplicação de uma ligeira compressão, o espectro deslocou-se no sentido dos menores comprimentos de onda, não sendo observado

qualquer alargamento do espectro nem variação da potência óptica da reflexão da rede de Bragg.



(a) (b)  
Figura 6.13 – (a) Placa sensora laminada em fibra de carbono/epóxido. (b) Resposta da rede de Bragg na placa sensora.

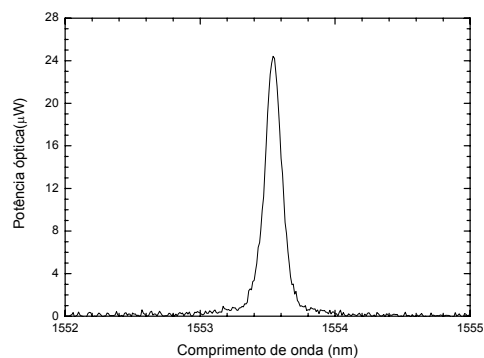
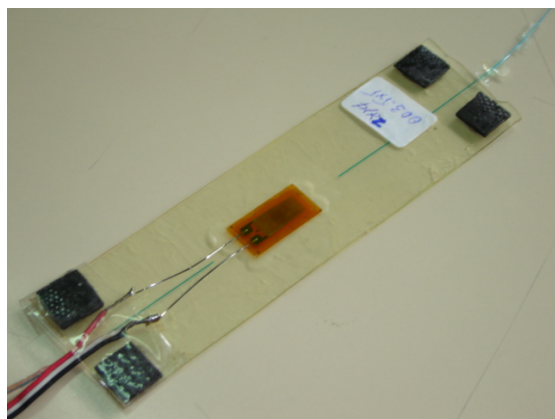
Na figura 6.14, apresenta-se a placa sensora laminada em fibra de vidro/epóxido, com o respectivo espectro óptico em reflexão obtido da rede de Bragg embebida.



(a) (b)  
Figura 6.14 – (a) Placa sensora laminada em fibra de vidro/epóxido. (b) Resposta da rede de Bragg na placa sensora.

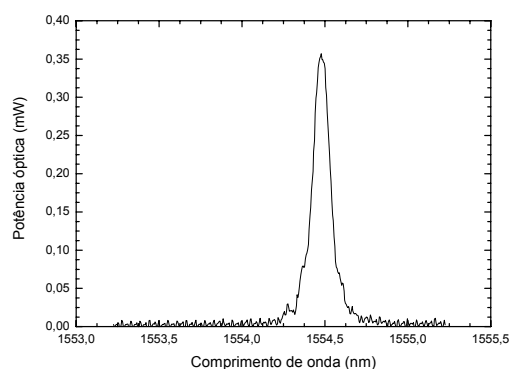
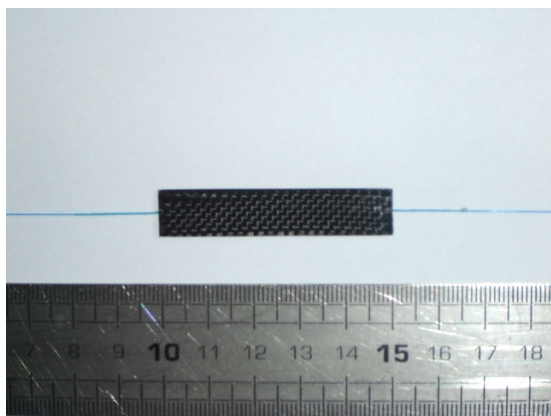
Observa-se que os espectros das redes embebidas apresentam-se com baixas perdas de potência óptica, embora este seja um dado qualitativo foi, no entanto, claro.

Por sua vez, na figura 6.15 apresenta-se a placa sensora obtida em resina de epóxido, o que tal como na anterior é perfeitamente visível a fibra óptica embebida, e inclusivamente, a localização da rede de Bragg.



(a) (b)  
Figura 6.15 – (a) Placa sensora em resina de epóxido. (b) Resposta da rede de Bragg na placa de resina de epóxido.

Uma placa particularmente interessante, e que vai no sentido do objectivo traçado inicialmente, é a placa que a seguir se apresenta, figura 6.16. é uma placa de dimensões reduzidas, com  $50 \times 10 \times 0,4 \text{ mm}^3$ , particularmente muito maneável.



(a) (b)  
Figura 6.16 – (a) Placa sensora laminada em fibra de carbono/epóxido de reduzidas dimensões. (b) Resposta da rede de Bragg na placa de carbono.

A placa apresentada foi produzida em autoclave, pelos processos já anteriormente descritos. No entanto, é com alguma dificuldade que se efectuam alguns ensaios com esta placa de reduzidas dimensões. Para se poderem realizar ensaios, com estas placas, em algumas das máquinas é necessário acoplá-las a outras placas, que lhe servem de base, e das quais já se conheçam as suas propriedades.

### Rosetas ópticas

As placas que se apresentam têm a particularidade de possuírem três sensores em rede de Bragg embebidos no material compósito, em três direcções principais, como sejam, a  $0^\circ$ , a  $90^\circ$  e a  $45^\circ$ , numa configuração rectangular. Posteriormente, num capítulo seguinte será dada mais atenção a este tipo de configurações. A figura 6.17 mostra uma roseta óptica, com três sensores em três fibras distintas. Esta configuração foi escolhida por razões técnicas do sistema de interrogação. No entanto, cada um dos sensores possui um comprimento de onda específico e diferente dos restantes.

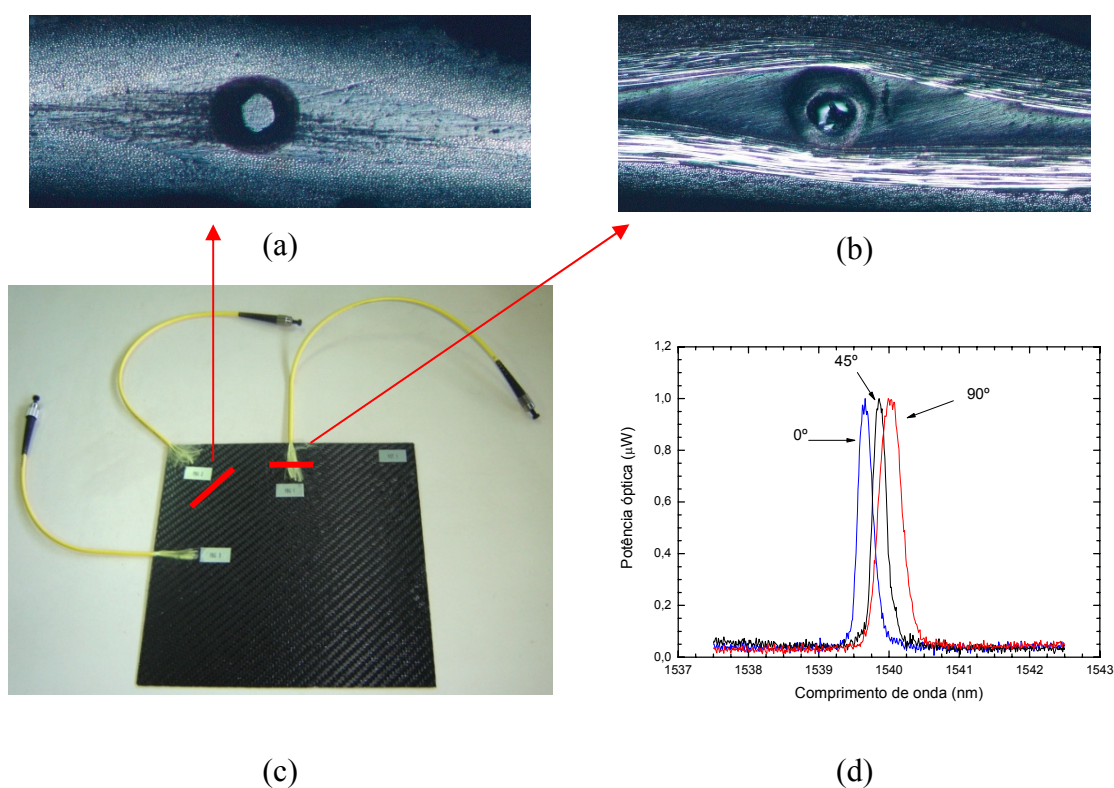
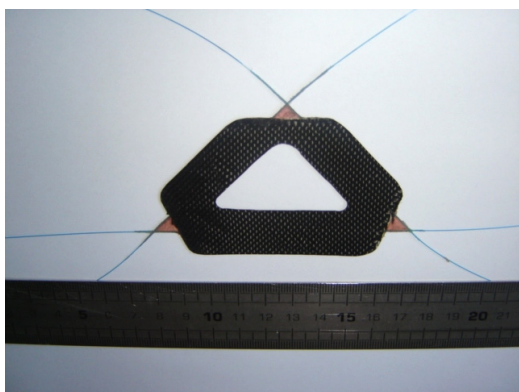


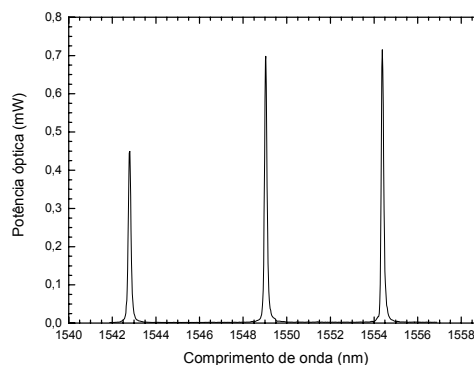
Figura 6.17 – (a) Corte do sensor a  $45^\circ$ . (b) Corte do sensor a  $0^\circ$ . (c) Placa sensora com uma Roseta óptica embebida. (d) Resposta das redes de Bragg embebidas na placa.

Na figura 6.17(a) e (b) é possível observar dois cortes efectuados à roseta na zona dos sensores. Um corte da placa foi realizado na zona do sensor que se encontrava a  $45^\circ$ , e o outro no sensor que encontrava a  $0^\circ$ . Neste último, a situação foi idêntica ao colocado a  $90^\circ$ .

Uma outra configuração empregue na construção de rosetas foi também a forma “delta”. Esta roseta tem a particularidade de ser bastante pequena, e com os três sensores inscritos numa única fibra óptica. Mais uma vez, os sensores estão separados em comprimentos de onda de forma a serem perceptíveis, caso contrário não seria fácil, ou mesmo possível distinguir qual o sensor que originaria um determinado comportamento. Esta roseta, figura 6.18, é bastante interessante pelo facto de ser muito sensível, e também muito manuseável. Observando os espectros obtidos, estes induzem a uma boa qualidade do embebimento.



(a)



(b)

Figura 6.18 – (a) Roseta óptica sensora em fibra de carbono/epóxido.

(b) Resposta das redes de Bragg embebidas na placa.

Os espectros em reflexão obtidos pelos sensores não se apresentam com a mesma potência óptica, facto que não é muito relevante dado que era necessário garantir que a reflectividade das redes de Bragg na fase da sua produção fossem todas iguais, o que por vezes isso não acontece, daí que surjam com intensidades ópticas de reflexão diferentes.



### Estrutura sanduíche por RTM

As experiências envolvendo estruturas sanduíche obtidas por RTM, são compostas por peles em tecido de carbono de elevada resistência, resina de epóxico (RTM6) sendo particularmente indicada para a realização de estruturas aeronáuticas, e de um núcleo de espuma estrutural (Rohacell 71). Na pele de uma das faces da estrutura sanduíche foram embebidos seis sensores em rede de Bragg, figura 6.19, entre as camadas de tecido de carbono seco. O molde utilizado é em alumínio e é fechado. O processo de enchimento do molde é descrito no capítulo três. A estrutura obtida foi depois transformada em provetes com as dimensões de  $220 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ .

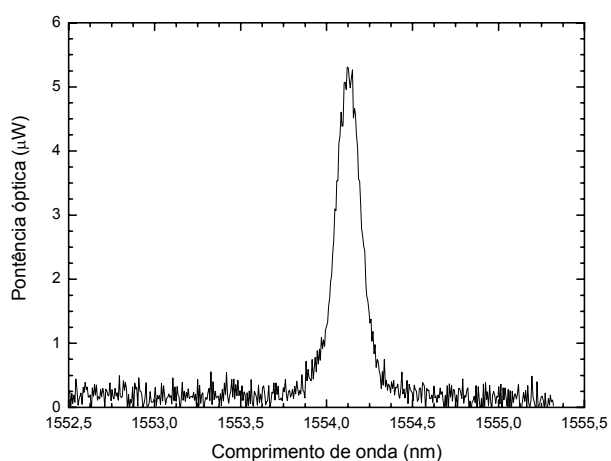
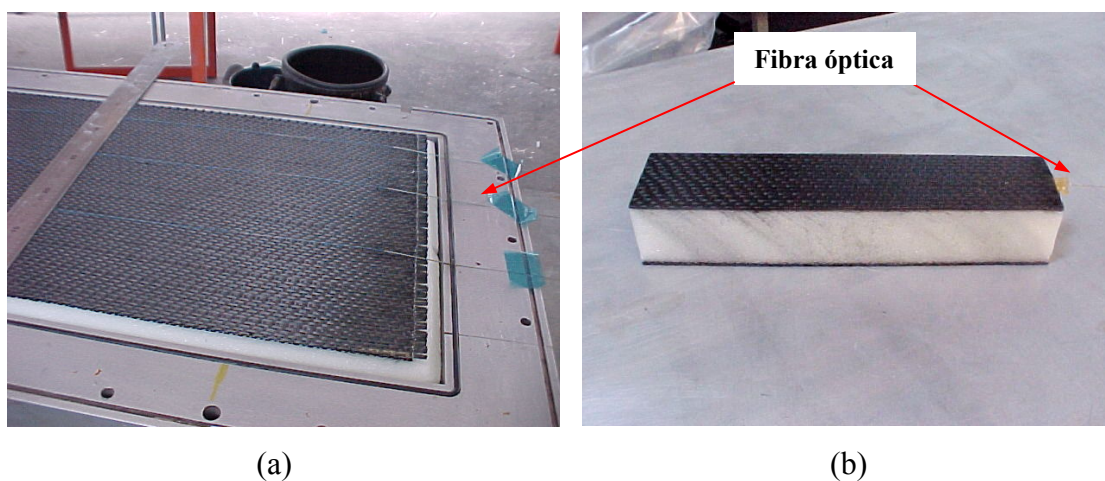


Figura 6.19 – (a) Embebimento de fibras ópticas por RTM. (b) Provette cortado da placa obtida por RTM, com sensor embebido. (c) Espectro em reflexão de uma das redes de Bragg embebidas na placa.

## 6.7 – Embebimento de uma fibra com uma cavidade interferométrica de Fabry-Pérot

Um outro sensor óptico envolvido num processo de embebimento foi o sensor em fibra óptica extrínseco, uma cavidade interferométrica de Fabry-Pérot. A sua utilização possibilitou a verificação da qualidade do embebimento deste tipo de sensor em placas laminadas de material compósito. No entanto, efectuou-se também o registo da resposta deste após o embebimento. A figura 6.20(a) mostra a fase da colocação da cavidade entre as camadas do material compósito, e na figura 6.20(b) em corte, a secção que inclui o tubo capilar, na zona da cavidade interferométrica.

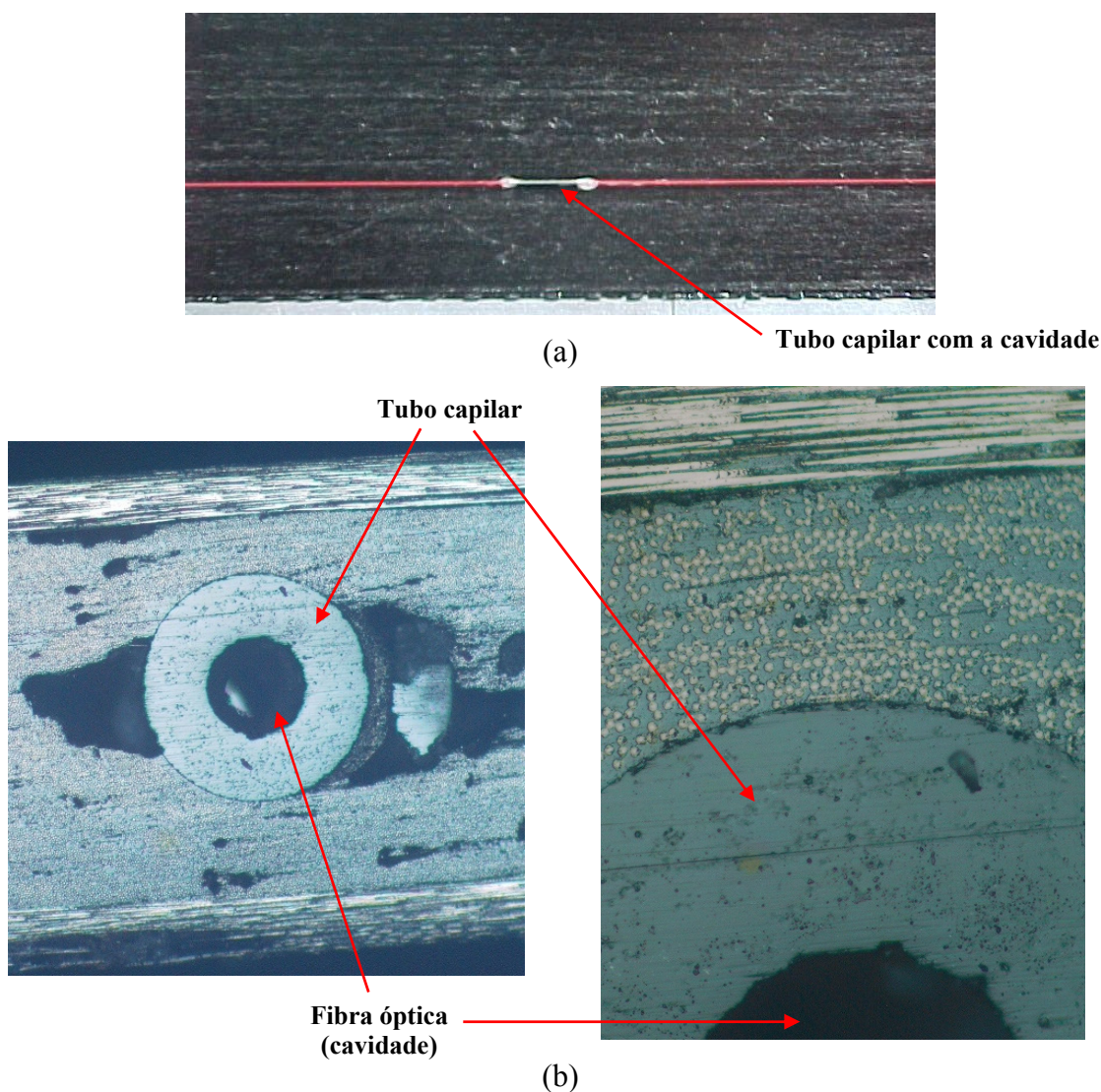


Figura 6.20 – (a) Colocação de um interferómetro entre placas de compósito.

(b) Secção transversal do embebimento na zona do tubo capilar.

Uma particularidade envolvida com o embebimento do sensor, foi efectivamente a espessura necessária para o laminado, não tanto pela espessura da fibra óptica, uma vez que esta tem um diâmetro exterior de 250  $\mu\text{m}$ , mas concretamente devido ao tubo capilar onde está a cavidade interferométrica. No sentido de facilitar o trabalho de embebimento foi particularmente usado pré-impregnado de material compósito unidireccional, em fibra de carbono/epóxico. Desta forma, o embebimento do tubo capilar será mais efectivo, conforme se mostra na figura 6.20. Observa-se na figura 6.20(b), que este embebimento apresenta uma boa interface, dado que os buracos laterais devem-se à qualidade de desbaste e polimento efectuadas e não à ausência de material da matriz.

Na figura 6.21, pode-se observar a resposta óptica em reflexão da cavidade interferométrica, assim como a resposta da rede de Bragg, quando iluminadas por uma fonte de espectro largo, obtidas após embebimento dos sensores no material compósito.

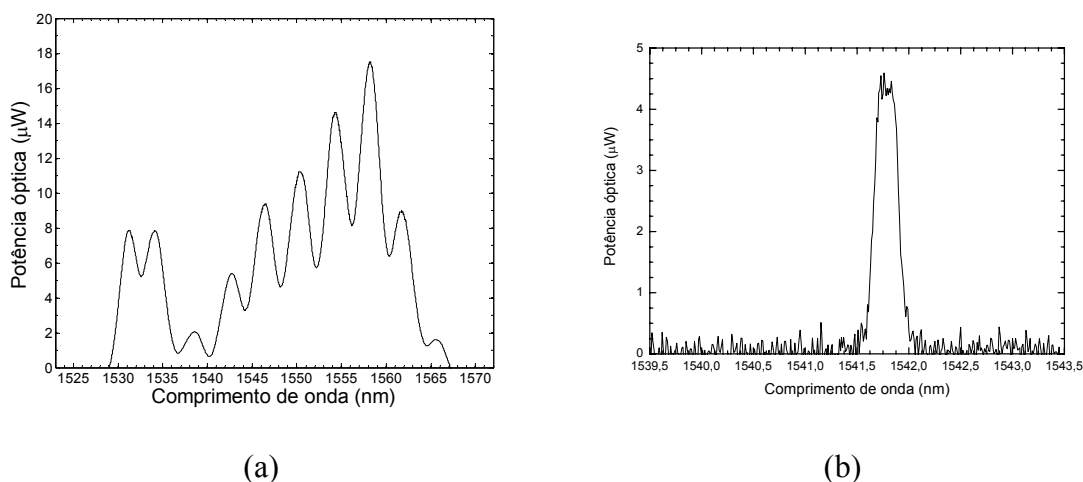


Figura 6.21 – (a) Resposta da cavidade após o embebimento. (b) Resposta da rede de Bragg.

Como se pode verificar ambos os sensores, estão “vivos” e a responder às solicitações a que são sujeitos. Tal foi verificado com pequenas solicitações que foram realizadas, e que mostraram a variação do comportamento dos sensores. Os ensaios realizados com as placas serão apresentados no capítulo seguinte.



# Capítulo 7

## 7 – Concepção e caracterização das placas sensoras

### 7.1 – Introdução

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento de uma placa sensora em material compósito que se pretende que possa ser utilizada para medir deformações de uma estrutura, quer por colagem nesta, ou ainda por embebimento numa estrutura maior. Verificou-se assim a necessidade de desenvolver um tipo de placa para proteger a rede de Bragg, e ao mesmo tempo servir-lhe de suporte, uma vez que esta tem tendência a partir-se. Quando meramente colada à superfície de uma estrutura, a placa a desenvolver deverá ser a mais fina possível, para não interferir significativamente com a estrutura.

Diferentes configurações da placa sensora foram consideradas, utilizando diferentes materiais, tais como os pré-impregnados de fibra de vidro/epóxico, pré-impregnados de fibra de carbono/epóxico e resina de epóxico. Foi efectuado um estudo, experimental e numérico, da configuração mais adequada, tendo em conta a dual

sensibilidade à temperatura e deformação das redes de Bragg e o eventual reforço da estrutura pela placa sensora.

No intuito de observar o comportamento dos sensores ópticos (redes de Bragg), quando embebidos no material compósito, realizaram-se com as placas sensoras alguns ensaios para verificar a integridade dos embebimentos. O princípio básico de operação consistiu em monitorizar a variação do comprimento de onda associado à condição de ressonância de Bragg, esta variação do comprimento de onda é independente da intensidade da fonte de luz, no entanto, uma das limitações significativas do sensor em rede de Bragg reside na sua dual sensibilidade à temperatura e à deformação [242], o que requer um controlo dos dois parâmetros. No caso dos ensaios realizados para este trabalho, foi utilizada uma sala de ensaios com controlo de climatização, pelo que se pode considerar que estes decorreram a uma temperatura constante, sem variações significativas, principalmente durante a realização destes.

Para observar o comportamento dos sensores, elaborou-se um sistema de monitorização da deformação a que as placas foram sujeitas. Este sistema foi aplicado ao conjunto placa compósita e sensor, quando estes foram submetidos a carregamentos estáticos e dinâmicos. Foram também realizados alguns ensaios dinâmicos com uma estrutura sanduíche obtida por RTM.

## **7.2 – Ensaios de deformação longitudinal**

### **7.2.1 - Introdução**

Um sensor de deformação eléctrico foi usado para comparação com os valores da deformação medidos pela rede de Bragg em fibra óptica embebida no material. O extensómetro eléctrico foi montado à superfície do material, mesmo por cima da posição do sensor óptico, tal como se pode ver para uma das placas ensaiadas, com a zona da rede de Bragg, perfeitamente perceptível por baixo do extensómetro, figura 7.1.

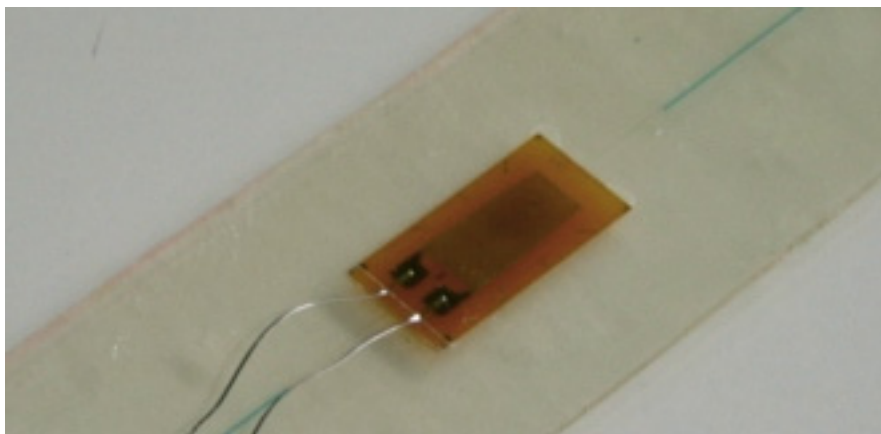


Figura 7.1 – Posicionamento do extensómetro em relação à rede de Bragg, na placa sensora em resina de epóxido.

O sensor eléctrico foi conectado a um sistema de aquisição de dados designado de Spider8 da HBM<sup>®</sup>, e este ligado a um computador. Refira-se que este sistema permite obter sinais de oito sensores, em medição simultânea, com uma taxa máxima de aquisição até 1200 Hz. O controlo e aquisição de dados são feitos através do software Catman 3.1<sup>™</sup>. As leituras foram realizadas através do set-up da figura 7.2.

O esquema de monitorização dos sensores ópticos foi sendo alterado ao longo do trabalho, em função das evoluções da unidade de interrogação conseguidas, mantendo sempre o mesmo set-up para o sensor eléctrico, o extensómetro.

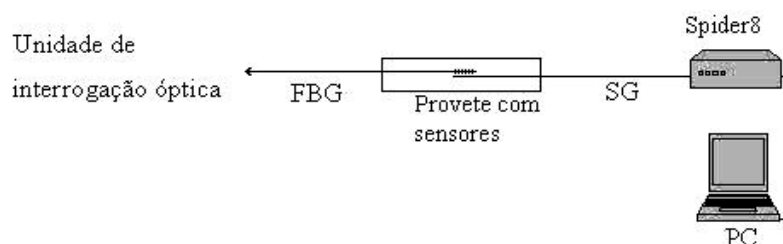


Figura 7.2 – Esquema do sistema de monitorização. FBG – Sensor de rede de Bragg em fibra óptica. SG – Sensor eléctrico, extensómetro.

Uma vez implementado todo o set-up, as placas sensoras foram sujeitas a ensaios mecânicos. Os dois tipos de sensores diferentes foram submetidos à tracção. A

calibração do sensor foi realizada por comparação com os valores de deformação longitudinais de um extensómetro montado à superfície, na mesma zona do sensor óptico, conforme observado na figura 7.1, com os valores medidos por um sensor de rede de Bragg. As placas sensoras foram submetidas a ensaios de tracção, na máquina de ensaios, INSTRON® Modelo 4208. Dependendo dos provetes ensaiados, foram usadas células de carga entre 1kN e os 100 kN. A velocidade do deslocamento do ensaio também foi controlada, pela própria máquina, e com velocidades a variar entre os 0,05 mm/min, e 1 mm/min. No entanto, a velocidade implementada dependeu da placa e do ensaio a realizar.

### 7.2.2 – Placa sensora em fibra de carbono/epóxico

Os testes de tracção efectuados à placa sensora de dimensões  $110 \times 30 \times 0,4 \text{ mm}^3$ , foram realizados na máquina de ensaios já anteriormente referida. A velocidade de deslocamento da máquina de ensaios foi controlada para um deslocamento de 0,1 mm/min. A placa de ensaio foi submetida a cargas sucessivas de forma a verificar a reprodutibilidade da resposta do sensor de rede de Bragg em fibra óptica, embebido na placa. Foram colocadas pequenas abas de protecção nos extremos da placa sensora, para evitar a destruição da fibra óptica, por esmagamento, na zona de aperto pelas garras da máquina de ensaios. As placas foram submetidas a ensaios de baixa carga para evitar danificarem-se, dada a possível destruição da fibra óptica por excesso de carga aplicada.

O set-up de interrogação da rede de Bragg para monitorização em tempo real consistiu numa fonte de espectro largo dopada com érbio, uma unidade de interrogação para sensores em rede de Bragg da FiberSensing SA, que permite interrogar e medir a variação do comprimento de onda, e um computador ligado à unidade de interrogação, de acordo com o segundo set-up descrito no capítulo 5. Na fase inicial foi também utilizado um analisador de espectros ópticos, já descrito no capítulo 5, para verificação da integridade do espectro óptico antes da realização dos ensaios e para observar a evolução do espectro ao longo do ensaio. A aquisição foi controlada por um computador com um programa compilado em LabView™, permitindo a visualização, processamento e gravação dos resultados.

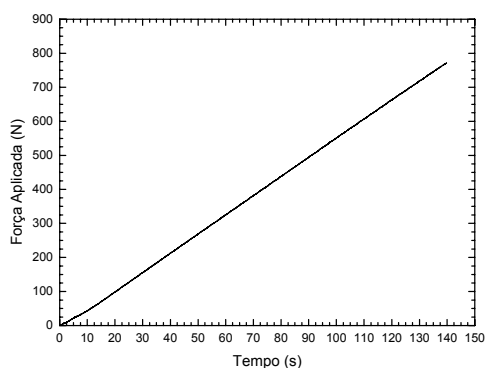


A montagem da placa sensora na máquina de ensaios é feita como se pode observar na figura 7.3, sendo também visível o extensómetro eléctrico que foi colado à superfície da amostra mesmo por cima da localização do sensor de rede de Bragg.

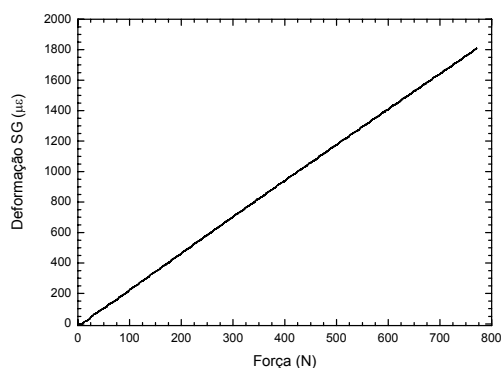


Figura 7.3 – Montagem da placa sensora na máquina de ensaios.

No caso desta placa sensora, as curvas obtidas da força aplicada em função da deformação atingida, permanecem lineares até ao valor máximo aplicado que, nesta placa, foi de 750 N, exibindo um comportamento elástico do material. A figura 7.4(a) mostra a força aplicada à placa ao longo do tempo. Na figura 7.4(b) apresenta-se a deformação registada pelo extensómetro colado à superfície da placa em função da força aplicada. Pode-se observar que a deformação registada pela placa é linear.



(a)



(b)

Figura 7.4 – (a) Força aplicada. (b) A deformação obtida para a força aplicada.

A sensibilidade à deformação do sensor óptico pode ser observada na figura 7.5, na qual se registou a variação do comprimento de onda de ressonância de Bragg, em função da força aplicada à placa sensora em carbono.

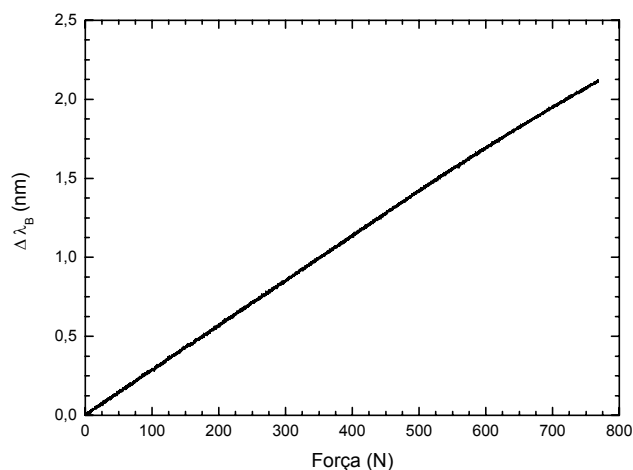


Figura 7.5 – Variação do  $\lambda_B$  com a força aplicada na placa sensora de carbono.

A placa sensora foi submetida a quatro carregamentos sucessivos até à força máxima aplicada, com os correspondentes descarregamentos à mesma velocidade da carga. O comportamento da placa nos sucessivos carregamentos está registado na figura 7.6. Pode-se observar que a mesma mantém sempre o mesmo comportamento ao longo dos carregamentos, assim como o valor máximo atingido.

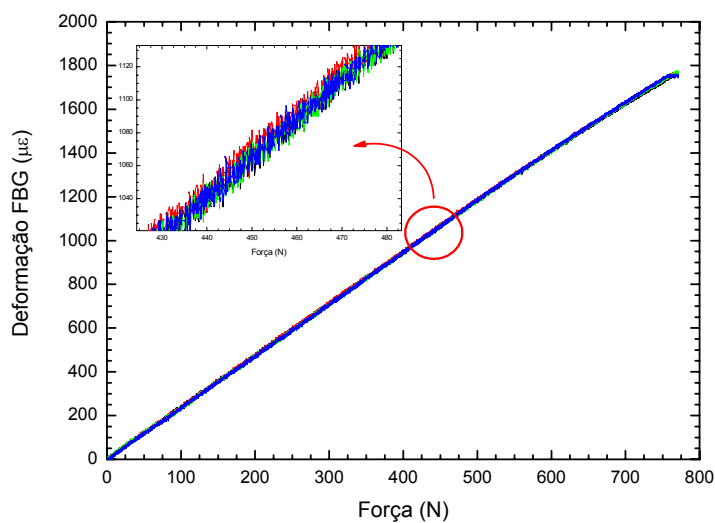


Figura 7.6 – Comportamento da rede de Bragg aos sucessivos carregamentos.

É possível verificar numa ampliação da zona compreendida entre os 420 N e os 480 N, da força aplicada, que a deformação do sensor óptico embebido na placa compósita não mostrou qualquer “cansaço” às solicitações impostas, durante os sucessivos carregamentos efectuados.

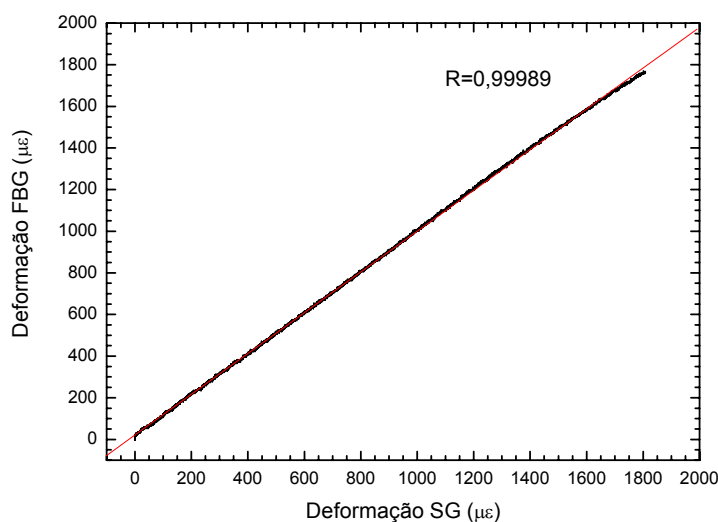


Figura 7.7 – Relação linear entre os sensores óptico e eléctrico.

Pode-se observar no gráfico da figura 7.7, uma boa correlação entre os dois sensores. Assim, será possível passar uma recta de calibração pelos dados obtidos. Da relação entre os dois sensores obtém-se um coeficiente de correlação quadrático de 0,99978.

Verificando-se assim um bom ajuste entre os valores da deformação do sensor óptico com o sensor eléctrico, praticamente a sobrepõem-se desde o início até quase ao fim do ensaio, ajustam-se perfeitamente até aos 1500  $\mu\epsilon$ . Uma vez atingido este valor, o sensor óptico começa a não acompanhar o andamento obtido pelos valores do seu correspondente eléctrico. Em consequência, uma ligeira diferença é verificada para a carga máxima atingida, com o sistema eléctrico a obter valores ligeiramente superiores ao sistema óptico, cifrando-se essa ligeira diferença em aproximadamente 32,5  $\mu\epsilon$ . A figura 7.8 mostra a comparação do comportamento dos dois sensores ao longo do ensaio.

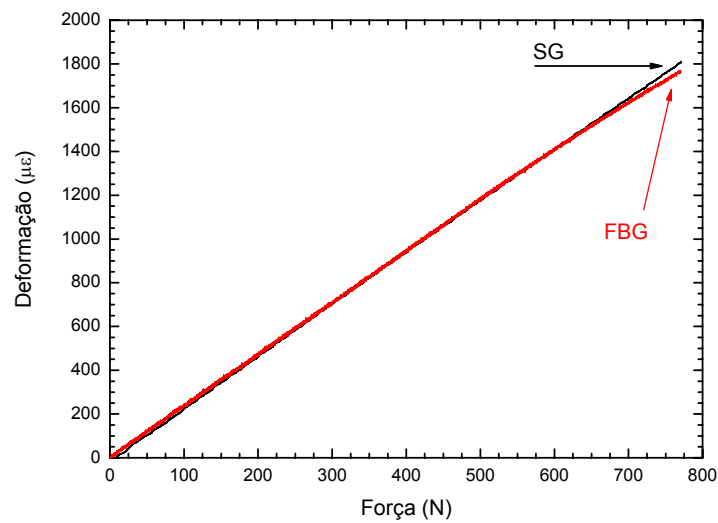


Figura 7.8 – Comportamento dos dois sensores na placa sensora.

Durante a realização dos ensaios com a placa sensora com deformação longitudinal, foram obtidos alguns espectros ópticos, para determinados valores da força, registrando a evolução da reflexão da rede de Bragg, em função da força aplicada. Esse comportamento pode ser observado na figura 7.9.

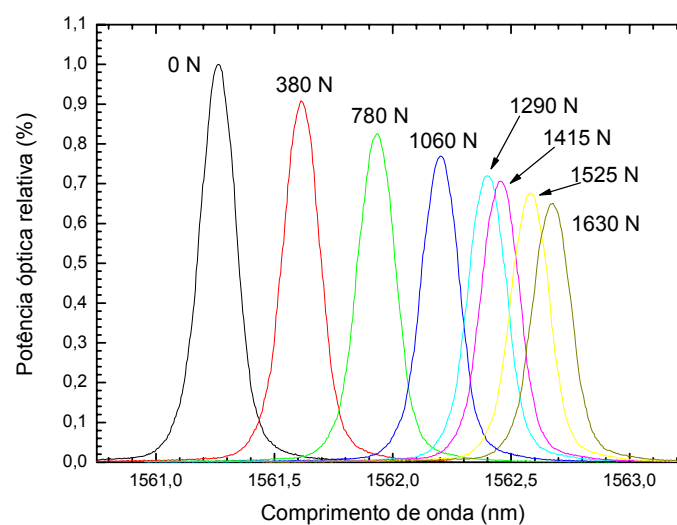


Figura 7.9 – Comportamento da ressonância de Bragg, com a carga aplicada.

É possível observar pelas representações espectrais apresentadas que há uma diminuição da potência óptica da luz reflectida pela rede de Bragg. O valor da força aplicada, para a obtenção destes espectros à placa sensora, foi superior ao dos ensaios anteriores, figura 7.9, no sentido de verificar as alterações que pudessem ocorrer com a rede de Bragg, para além daquele valor anteriormente ensaiado. Observa-se que logo no primeiro espectro obtido, para a primeira carga, há uma ligeira redução da potência óptica, tendência que se vai manter ao longo do ensaio com as sucessivas cargas aplicadas, mas também um ligeiro alargamento espectral, valor este que se mantém quase inalterável até aos 1525 N. O último dos espectros apresenta uma maior largura à meia altura do que os anteriores, verificando-se que a diferença na largura à meia altura entre os espectros obtidos a 0 N e a 1630 N, é de 0,017 nm.

### 7.2.3 – Placa sensora em fibra de vidro/epóxico

A placa sensora em fibra de vidro/epóxico de dimensões  $110 \times 30 \times 0,35 \text{ mm}^3$ , foi submetida a ensaios de tracção na máquina de ensaios universal. A velocidade dos ensaios foi controlada para um deslocamento de 0,1 mm/min. Todo o procedimento efectuado com a realização dos ensaios foi igual ao adoptado para a placa sensora em fibra de carbono/epóxico. A figura 7.10 mostra a placa sensora montada na máquina de ensaios, quando da realização destes.

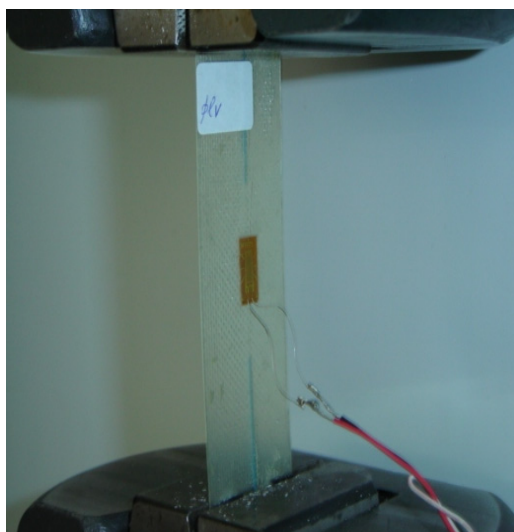


Figura 7.10 - Montagem da placa sensora na máquina de ensaios.

Esta placa sensora foi submetida a sucessivos carregamentos de forma a verificar a reprodutibilidade da resposta do sensor em rede de Bragg embebido. De igual forma, foram colocadas abas de protecção para a fibra óptica, na placa sensora, permitindo dessa forma uma melhor fixação na máquina de ensaios e, por outro lado, garantindo que a fibra óptica não sofria qualquer dano por pressão excessiva, quer devido ao aperto das amarras na altura do posicionamento da placa, quer ainda durante a realização dos próprios ensaio de carga, pois uma pressão excessiva e localizada sobre a zona da fibra óptica, poderá levar esta a perder definitivamente o sinal. A placa foi submetida a ciclos de ensaios de carga até uma força de 400 N.

O sistema de interrogação da fibra óptica adoptado foi o segundo set-up apresentado no capítulo 5. A visualização, processamento e gravação de resultados foi realizada com recurso a um programa em LabView<sup>TM</sup>. O extensómetro foi colocado à superfície da placa, mesmo por cima do sensor de Bragg, e conectado ao Spider8 da HBM<sup>®</sup>, que, através do programa Catman 3.1<sup>TM</sup>, controlado-se o processo de aquisição de dados.

A força e a deformação impostas à placa sensora, foram registadas e podem-se observar na figura 7.11 (a) e (b).

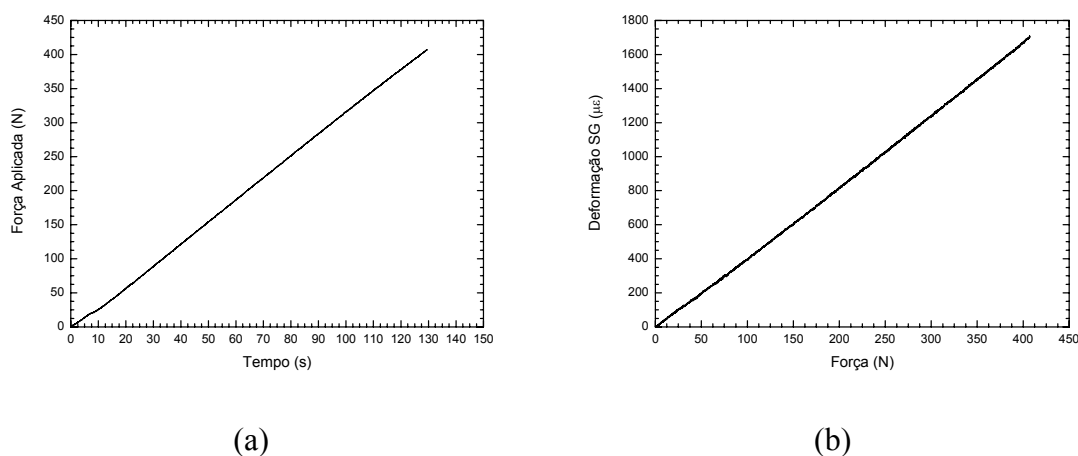


Figura 7.11 – (a) Força aplicada à placa. (b) Deformação imposta à placa sensora.

Esta deformação aplicada à placa sensora é medida pelo extensómetro eléctrico. Observa-se que a deformação da placa apresenta um comportamento linear.

Na figura 7.12, é possível observar a sensibilidade do sensor óptico embebido através da variação do comprimento de onda de ressonância de Bragg,  $\lambda_B$ , em função da força aplicada à placa sensora.

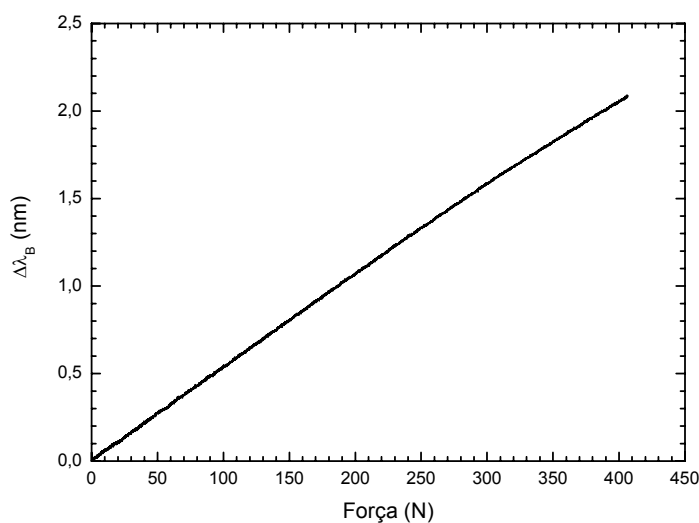


Figura 7.12 – Sensibilidade da placa sensora em fibra de vidro/epóxico.

Após ter sido submetida aos sucessivos ensaios de carga, com uma velocidade de descarga igual à efectuada na carga, observou-se que a placa tem um comportamento perfeitamente reprodutível, o que traduz o comportamento elástico que apresenta para a carga aplicada. Observou-se assim uma boa transferência de carga por parte da placa compósita para o sensor de rede de Bragg. O comportamento registados pelos sucessivos carregamentos está representado na figura 7.13.

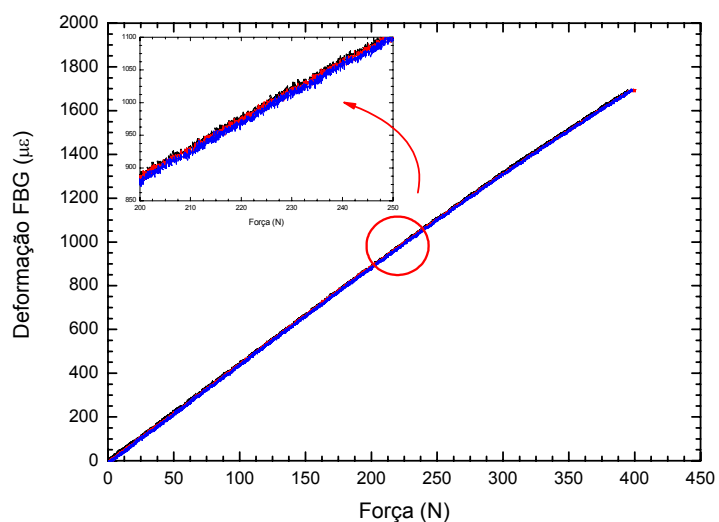


Figura 7.13 – Comportamento da rede de Bragg nos sucessivos carregamentos efectuados à placa sensora de fibra de vidro/epóxico.

Uma ampliação dos registos obtidos é apresentada na figura 7.13, sendo possível verificar o comportamento dos ensaios realizados, numa zona da força aplicada entre os 200 N e os 250 N.

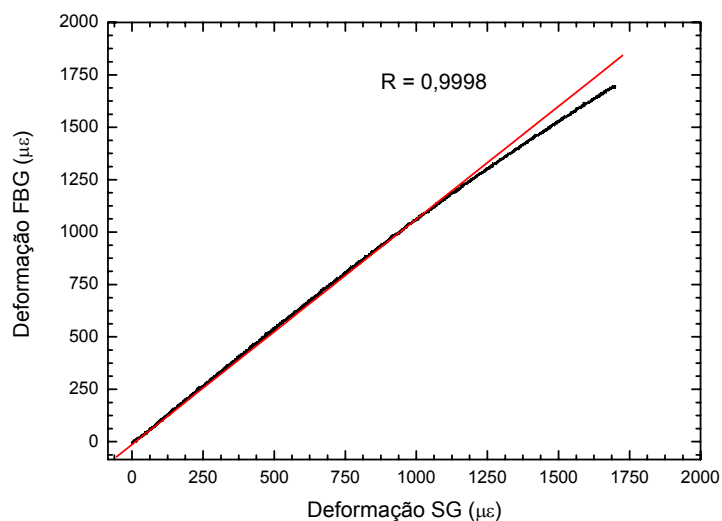


Figura 7.14 – Relação entre os sensores óptico e eléctrico.



Na figura 7.14 efectua-se uma representação dos comportamentos do sensor óptico em função do sensor eléctrico, verifica-se que têm um comportamento linear até aos 1250  $\mu\epsilon$ , a que corresponde uma força aplicada de 300 N, aproximadamente. A partir deste valor a relação entre os dois sensores deixa de ser perfeitamente linear, sendo cada vez mais evidente na aproximação dos valores máximos da carga aplicada. O coeficiente de correlação quadrático entre os valores dos dois sensores na zona linear é de 0,9996.

O comportamento dos dois sensores em função da carga aplicada pode ser observado na figura 7.15. Verifica-se um desfasamento entre os valores máximos atingidos pelos sensores, em que o sensor eléctrico apresenta maiores valores do que o sensor óptico.

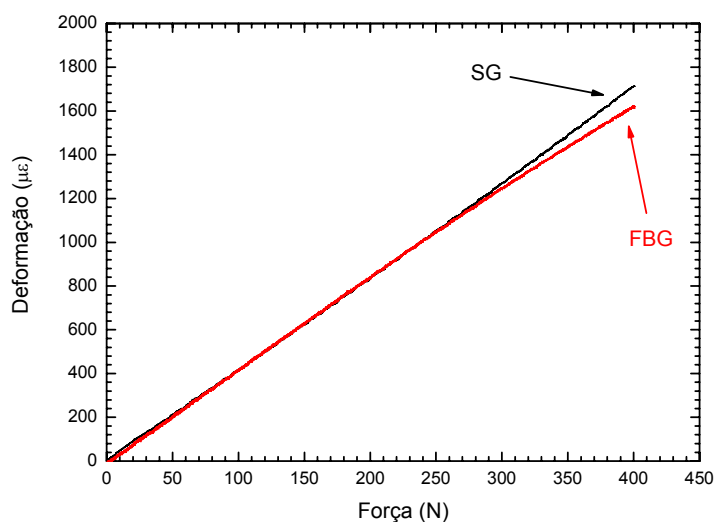


Figura 7.15 – Comportamento dos dois sensores na placa sensora.

Obtêm-se maiores valores de deformação para o sensor eléctrico. A diferença entre os valores é de aproximadamente 80  $\mu\epsilon$ . Os valores da deformação fornecidos pelo sensor eléctrico têm um comportamento progressivo e linear, contrariamente aos valores fornecidos pelo sensor óptico, que a partir de uma força de 300 N têm uma progressão mais lenta. Este tipo de comportamento foi também verificado na placa sensora em fibra de carbono/epóxico, para os valores máximos do ensaio atingidos por esta.

Durante a realização dos ensaios de carga à placa sensora obtiveram-se os espectros em reflexão da rede de Bragg. Na figura 7.16 observa-se a sua evolução ao longo de um ensaio.

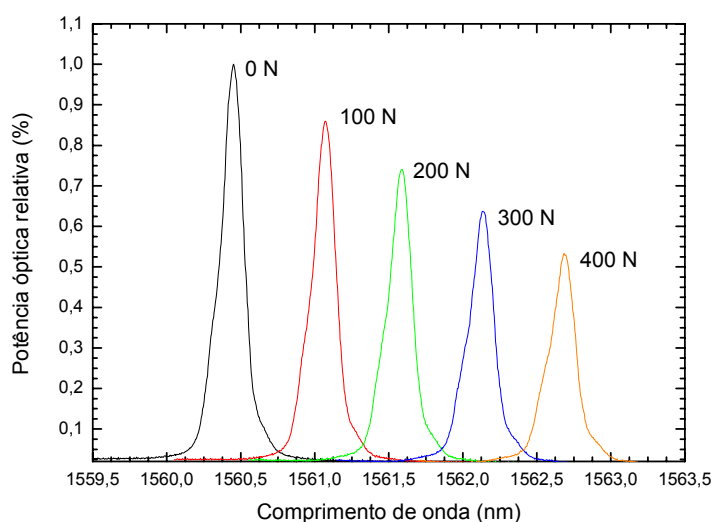


Figura 7.16 – comportamento da ressonância de Bragg, com a carga aplicada.

É imediato observar, pelas representações espectrais apresentadas, que há um deslocamento característico de  $\lambda_B$  para os maiores comprimentos de onda, mas também uma diminuição da potência óptica da rede. Esta deve estar relacionada com o afastamento que ocorre na própria rede quando a fibra óptica está sujeita à tracção. Observa-se que nos primeiros espectros obtidos não se verifica qualquer alargamento espectral, valor que se mantém quase inalterável até aos 200 N, a partir desse valor há um alargamento evidente. A diferença entre a largura à meia altura dos dois espectros extremos é de 0,022 nm.

#### 7.2.4 – Placa sensora em resina de epóxico

A placa sensora em resina de epóxico, de dimensões  $110 \times 30 \times 0,5 \text{ mm}^3$ , foi também ela submetida a ensaios de tracção na máquina de ensaios. Efectuando os mesmos procedimentos que às placas anteriormente ensaiadas, a velocidade de

deslocamento da máquina de ensaios foi controlada para um deslocamento de 0,1 mm/min. A amostra foi submetida a sucessivas cargas de forma a verificar a reprodutibilidade da resposta do sensor de Bragg em fibra óptica embebido, assim como a sua sensibilidade às deformações impostas.

Nesta amostra, tal como aconteceu nas anteriores, colaram-se abas para protecção da fibra óptica por esmagamento e para colocação da placa na máquina de ensaios. Os ensaios foram realizados em baixa carga, de forma a evitar dano na placa sensora. Na figura 7.17 pode-se observar a placa colocada na máquina de ensaios, segundos antes da realização destes.

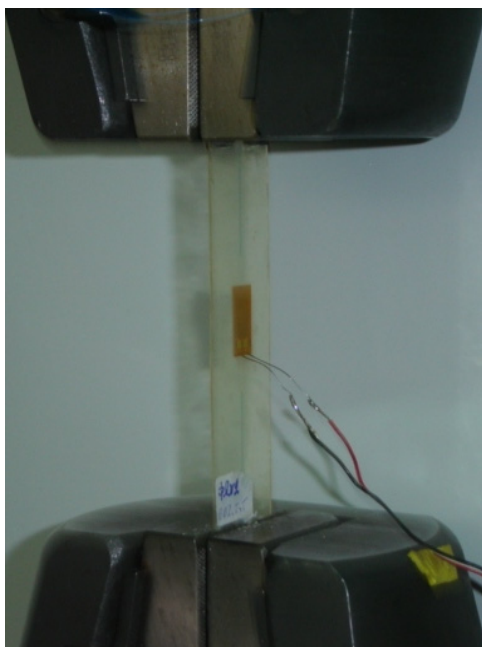


Figura 7.17 – Montagem da placa sensora em resina na máquina de ensaios.

Os sistemas de interrogação, com a respectiva visualização, processamento e gravação de dados, para os sistemas óptico e eléctrico, são os mesmos que foram utilizados nas placas sensoras anteriormente apresentadas.

A placa sensora foi submetida a uma carga máxima de 240 N, cujo comportamento com o tempo está representado na figura 7.18 (a).

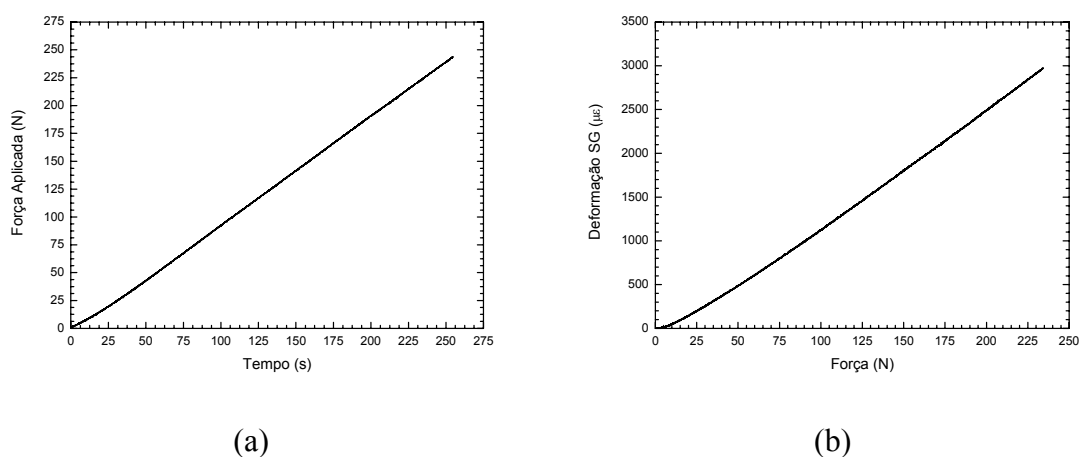


Figura 7.18 – (a) Força aplicada à placa. (b) Deformação imposta à placa sensora.

Em função dessa força aplicada, uma deformação é imposta à placa, cujos registos estão representados na figura 7.19 (b). Os valores foram obtidos por um extensómetro colado à superfície da placa, como se pode observar na figura 7.17.

Na figura 7.19, observa-se a sensibilidade do sensor óptico obtido pela variação do comprimento de onda de ressonância de Bragg,  $\lambda_B$ , em função da força aplicada à placa sensora em resina de epóxico.

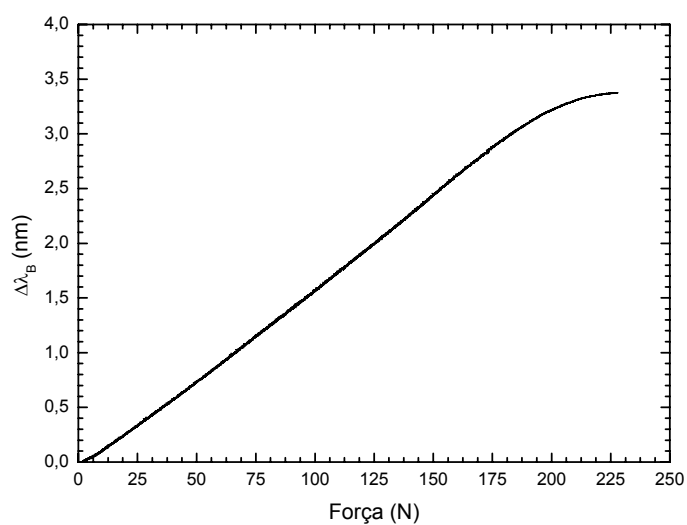


Figura 7.19 – Sensibilidade da placa sensora em resina de epóxico.

Como se pode verificar o comportamento do sensor óptico, com a carga aplicada não é linear ao longo de todo o ensaio realizado. Para esta placa, o alongamento é também maior, sendo sensivelmente o dobro do verificado para as placas anteriores.

Na figura 7.20 pode-se observar o comportamento da placa quando submetida às sucessivas cargas aplicadas. Verificando-se que esta apresenta sempre o mesmo comportamento, para todos os carregamentos. Refira-se que a velocidade da descarga é igual à da carga. Observa-se, assim, que a deformação obtida pelo sensor óptico é sempre reproduzível. Pode-se observar na mesma figura, e numa zona entre os 125 N e os 150 N da força aplicada, o comportamento do sensor óptico nos carregamentos efectuados. Apesar do comportamento verificado pelo sensor em rede de Bragg, a amostra denota um comportamento elástico para os valores da força aplicada.

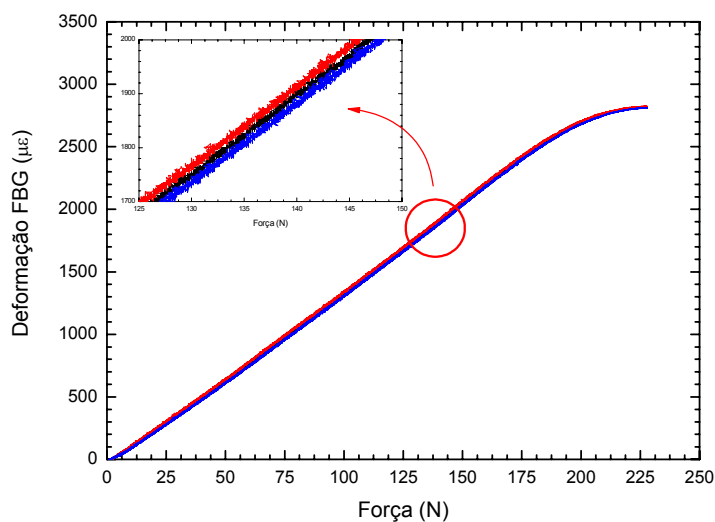


Figura 7.20 – Comportamento da rede de Bragg nos sucessivos carregamentos efectuados à placa sensora em resina de epóxico.

Numa representação entre as deformações registadas pelos sensores, na figura 7.21, pode-se verificar que esse relacionamento não é linear em toda a extensão do ensaio. No entanto, numa zona compreendida entre os 250  $\mu\epsilon$  e os 2250  $\mu\epsilon$ , verifica-se uma certa linearidade, o que corresponde a aproximadamente 2000  $\mu\epsilon$ . Na zona linear o coeficiente de correlação quadrático é de 0,9998.

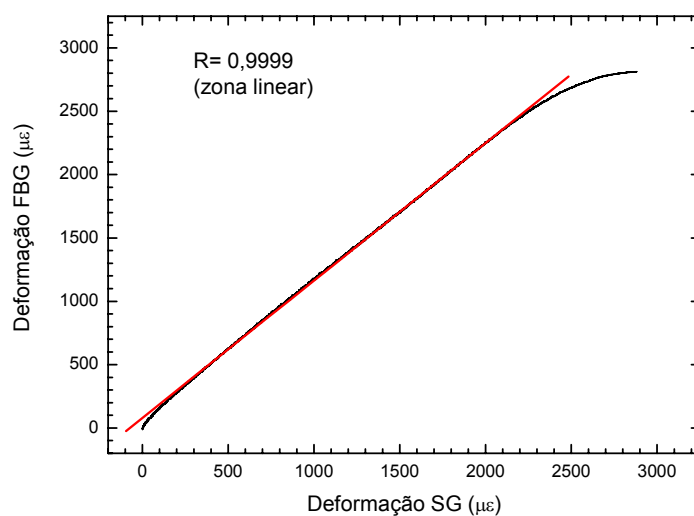


Figura 7.21 – Relação entre as deformações dos sensores óptico e eléctrico.

O comportamento dos dois sensores, em leituras simultâneas, pode ser observado em função da carga aplicada, figura 7.22. Verifica-se mais uma vez que o sensor eléctrico obtém maiores valores do que o sensor óptico, para os valores máximos da carga aplicada.

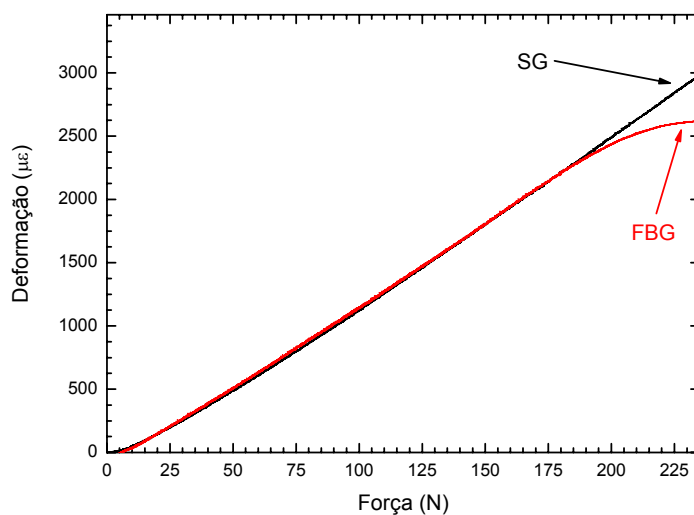


Figura 7.22 – Comportamento dos dois sensores na placa sensora em resina de epóxico.

Este tipo de comportamento já tinha sido registado para as placas sensoras em fibra de carbono/epóxico, e em fibra de vidro/epóxico. Nesta placa sensora a diferença entre os valores é de aproximadamente  $160 \mu\epsilon$ . Verificou-se que ambos os sensores têm um comportamento inicial idêntico, mas não linear. Por volta dos  $2500 \mu\epsilon$ , deixa de haver linearidade e assumem comportamentos distintos. A partir desses valores da deformação, o sensor eléctrico mantém um comportamento e linear, até ao valor máximo atingido pelo ensaio, contrariamente aos valores fornecidos pelo sensor óptico, que a partir de uma força de 185 N, aproximadamente, têm uma progressão mais lenta.

Durante a deformação longitudinal a que a placa foi submetida, com a força aplicada, foram obtidos ao longo do ensaio alguns espectros, que mostram o comportamento em reflexão da rede de Bragg embebida na placa sensora em resina de epóxico. A figura 7.23 mostra esse comportamento observado.

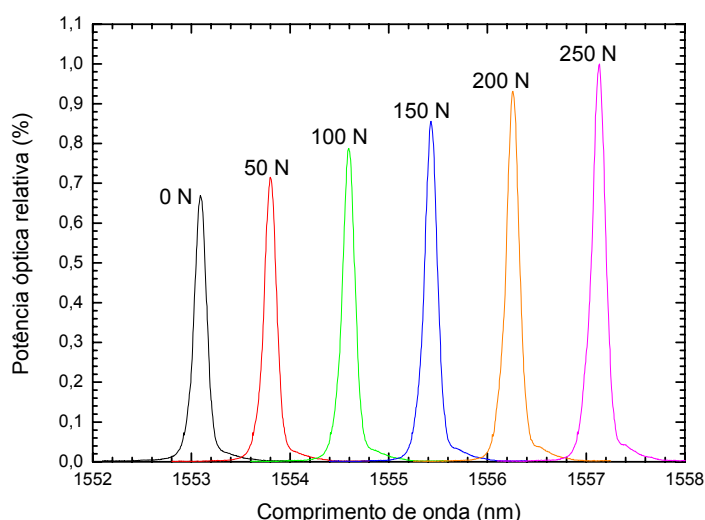


Figura 7.23 – Comportamento da ressonância de Bragg, com a carga aplicada.

As representações espectrais obtidas para a placa apresentam um comportamento interessante, verificando-se, contrariamente às placas sensoras anteriores, um aumento em termos da potência óptica reflectida pela rede de Bragg. Este aumento poderá estar relacionado com o processo de cura da resina, já que nessa fase ela sofre uma contracção ligeira, comprimindo a rede. Assim, com a aplicação de uma carga,

possivelmente, há uma libertação da compressão a que a fibra estava sujeita, e que se vai reflectir no aumento da potência óptica. O alongamento da rede de Bragg é também o resultado da aplicação da carga à placa. Contudo, não se verifica um alargamento muito significativo dos espectros ao longo do ensaio, cujas diferenças encontradas para a largura a meia altura são entre os valores dos espectros a 0 N e a 250 N é de 0,012 nm. Observa-se, assim, um alargamento relativamente pequeno em função da elongação obtida pela placa. Tal em parte, poderá ser explicado pela maior elasticidade da resina de epóxico. No caso desta placa o alargamento espectral é lento e progressivo.

#### **7.2.5 – Discussão dos resultados das placas sensoras ensaiadas**

Pode-se observar pelos ensaios realizados, com os carregamentos sucessivos sobre as placas sensoras em ensaio, que as mesmas permitem obter resultados muito semelhantes entre si, denotando que os materiais utilizados apresentam um comportamento elástico, para as gamas utilizadas. Os valores da força máxima aplicada possível nas placas dependem do material usado na sua concepção.

Observa-se pelos dados obtidos, nomeadamente dos valores obtidos pelos sensores ópticos, que estes não atingem os limites dos ensaios considerados, ou seja, não acompanham os sensores eléctricos usados para a calibração. Situação verificada em todas as placas, mas com maior relevo na placa sensora em resina de epóxico. As diferenças verificadas entre os dois sensores usados no termo de comparação, podem ser explicadas pelo facto do sistema de interrogação e aquisição óptico apresentar-se com uma limitação que inicialmente não estava prevista, e a mesma não tinha sido detectada nos ensaios iniciais levados a cabo, quando da participação no desenvolvimento das unidades de interrogação óptica. Refira-se que, nessa data, as unidades desenvolvidas não apresentavam esse tipo de limitação, embora não tivessem a possibilidade de efectuar aquisições com taxas tão elevadas. Assim, com a introdução das últimas gerações do sistema de interrogação e aquisição óptico, esta situação não foi verificada e acautelada. A situação em si é relativamente simples, e consiste no facto da unidade de interrogação óptica possuir um filtro em torno do valor dos comprimentos de onda de ressonância de Bragg, usados nas placas sensoras através dos quais é realizada a medição das variações do  $\lambda_B$ , nas diferentes solicitações, as quais possuem uma



amplitude de sensivelmente 4 nm. Normalmente o que acontece, é que a rede de Bragg é inscrita na fibra óptica ligeiramente acima do valor mais baixo do filtro, por vezes de 1 nm. Na fase de produção das placas sensoras, como anteriormente se referiu, é aplicada uma ligeira tensão à fibra óptica, de sensivelmente 1 nm. Somando as contribuições, já só será possível numa situação destas fazer variar o  $\lambda_B$  em mais 2 nm, valor que, no entanto, dependerá muito do valor inicial inscrito na fibra óptica. Acontece porém, que quando esses valores são ultrapassados o primeiro indício, muito antes da ruptura do sensor óptico, é precisamente este apresentar um comportamento tal como aquele que é verificado claramente na placa sensora em resina de epóxido. A situação descrita, é verificada nas placas sensoras com maior extensão à força aplicada, razão porque é mais evidente na placa em resina de epóxido, cujo Módulo de Young é bastante menor.

Assim dependendo das aplicações poder-se-á alterar a concepção da placa sensora, embebendo sensores ópticos com um valor de  $\lambda_B$ , que após produzida permita aproveitar toda a janela do filtro óptico.

Em função dos acontecimentos, significa que a placa sensora com maior amplitude de ensaios possíveis, é a placa sensora em fibra de carbono/epóxido. Esta apresenta também uma enorme vantagem comparativamente com as outras duas, o coeficiente de expansão térmico do material usado na sua concepção tem uma contribuição tão pequena que pode ser perfeitamente desprezada e permite realizar a maior parte dos ensaios, eliminando a influência da componente da temperatura da placa sensora.

Em função do exposto, será a placa de fibra de carbono/epóxido produzida em autoclave, o alvo preferencial dos ensaios seguintes.

## 7.3 – Concepção de uma placa sensora em fibra de carbono com embebimento de fibras ópticas

### 7.3.1 – Introdução

Ao introduzir uma fibra óptica de diâmetro 250  $\mu\text{m}$  numa placa compósita de espessura 400  $\mu\text{m}$ , pode-se esperar que a presença desta venha alterar as propriedades mecânicas do compósito hóspede. Um modelo 3D de análise de elementos finitos, FEM (*Finite Element Model*) é aqui aplicado para simular o comportamento da fibra óptica quando embebida na placa sensora laminada em material compósito, e esta submetida a um ensaio de tracção. O objectivo pretendido do modelo é mostrar o campo de tensões em torno da fibra óptica, mas também calcular e comparar as deformações na fibra óptica e no laminado hóspede. Considera-se que as condições de interface são importantes para a transferência de carga entre o material e a fibra óptica. Na abordagem realizada foi também considerada a influência do revestimento da fibra óptica. Por fim, é também analisado o eventual efeito de reforço da placa sensora quando colada à superfície de um provete em material compósito reforçado em fibra de vidro impregnada com resina de epóxico, com a obtenção das deformações quando o conjunto é submetido a um ensaio de tracção.

### Considerações do modelo

Os modelos de elementos finitos foram desenvolvidos usando o software ABAQUS<sup>TM</sup> na sua versão 6.5 standard. O laminado foi discretizado usando elementos 3D hexaédricos com 20 nós, de denominação de C3D20R que permitem reduzir o esforço computacional, sendo a fibra óptica também realizada por elementos 3D hexaédricos, com a mesma denominação. As malhas foram geradas de forma semi-automática de modo a optimizá-la na interface fibra óptica/material compósito.

Para a criação dos modelos foram feitas algumas suposições, nomeadamente:

- Não há bolsas de resina à volta da fibra óptica após o embebimento.
- Na interface entre a fibra óptica, o revestimento e o material compósito, não há descontinuidade.
- O material compósito é considerado homogéneo e ortotrópico.

- O campo de deformação em volta da fibra óptica, na zona do sensor, é considerado como sendo uniforme.
- A fibra óptica, o revestimento e o material compósito têm um comportamento linear elástico.

Para além das suposições anteriormente referidas, foram também assumidas duas considerações com o objectivo de simplificar os modelos, e que devem ser tomadas em linha de conta para a elaboração de um modelo opto-mecânico, ou seja, que permita relacionar a variação do comprimento de onda da rede de Bragg com as deformações no compósito, e também na possível simulação dos espectros de reflexão, e que são:

- As tensões residuais após o fabrico são consideradas pouco significativas e, por conseguinte, não são consideradas (verificando-se experimentalmente que nem sempre é assim).
- A microestrutura do tecido “twill” não é considerada.

As propriedades mecânicas ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ ) do módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, e módulo de corte, respectivamente, das diversas camadas consideradas foram determinadas a partir de ensaios mecânicos, e também através do software ESAComp<sup>®</sup> fundamentalmente para as propriedades fora do plano. Os valores considerados estão resumidos na tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Propriedades mecânicas das camadas consideradas

| Material                                | $E_1$<br>[GPa] | $E_2$<br>[GPa] | $E_3$<br>[GPa] | $\nu_{12}$ | $\nu_{13}$ | $\nu_{23}$ | $G_{12}$<br>[GPa] | $G_{13}$<br>[GPa] | $G_{23}$<br>[GPa] |
|---|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Twill 2/2 de fibra de carbono/epóxico   | 54,05          | 54,05          | 4,46           | 0,024      | 0,325      | 0,325      | 2,29              | 1,68              | 1,68              |
| Laminado tafetá fibra de vidro/ epóxico | 19,34          | 19,34          | 8,819          | 0,342      | 0,342      | 0,38       | 4,315             | 4,315             | 3,2               |
| Adesivo de epóxico                      | 4              | 4              | 4              | 0,35       | 0,35       | 0,35       | -                 | -                 | -                 |
| Fibra óptica não revestida (sílica)     | 73,1           | 73,1           | 73,1           | 0,17       | 0,17       | 0,17       | -                 | -                 | -                 |
| Revestimento acrílico                   | 0,045          | 0,045          | 0,045          | 0,34       | 0,34       | 0,34       | -                 | -                 | -                 |

### 7.3.2 – Modelo numérico da placa sensora com a fibra óptica sem revestimento

Para simplificação do modelo, foi considerado um comprimento de 2 mm, que se pode considerar representativo do comprimento total da placa em questão, numa zona afastada dos encastramentos realizados nas extremidades da placa. Adicionalmente, são também usadas condições de simetria no sentido de diminuir o número de elementos do modelo, a geometria e condições fronteira apresentam-se na figura 7.24. Neste sentido, torna-se apenas necessário modelar um quarto da placa.

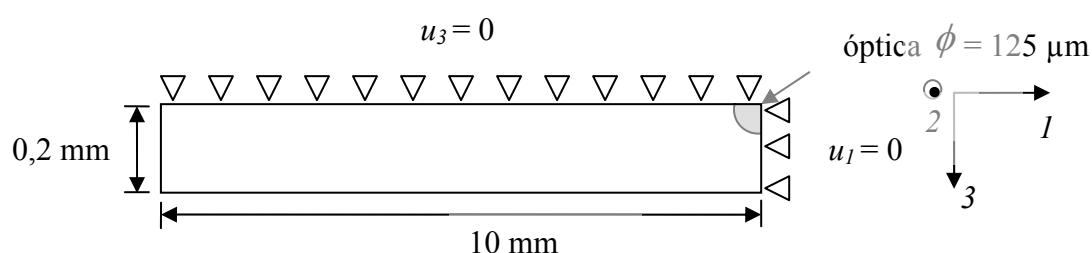


Figura 7.24 – Geometria e condições fronteira consideradas.

A malhagem da secção considerada da placa sensora foi realizada a partir de 10900 elementos. Na figura 7.25, apresenta-se uma parte do modelo, mostrando a malhagem considerada para a fibra óptica e na sua zona envolvente.

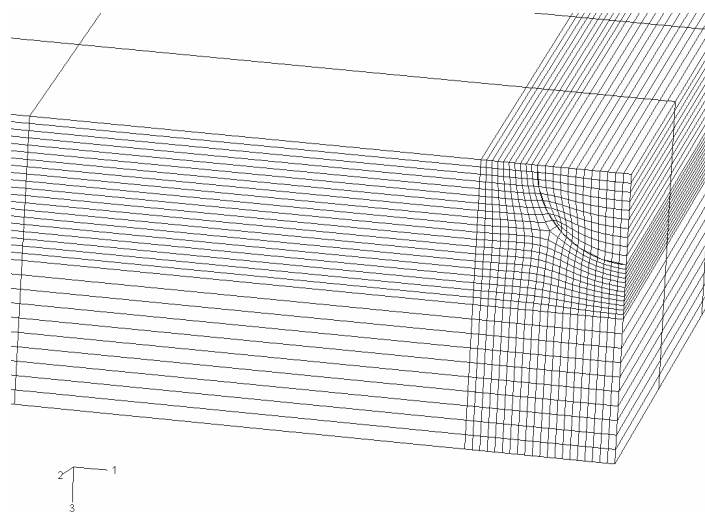


Figura 7.25 – Malhagem 3D da placa sensora com fibra óptica sem revestimento.

O provete é submetido a um carregamento em tracção de 750 N segundo o seu comprimento, ou seja, no eixo 2. Nas figuras 7.26 e 7.27 estão representadas as tensões transversais, na vizinhança da fibra óptica, na direcção da largura, eixo 1, e da espessura, eixo 3, respectivamente.

Pode-se observar que a presença da fibra óptica induz de facto uma alteração no campo de tensões. No entanto, a extensão da sua actuação é particularmente pequena, sendo mais sentida numa extensão de 0,02 mm, com uma rápida diminuição, particularmente na espessura.

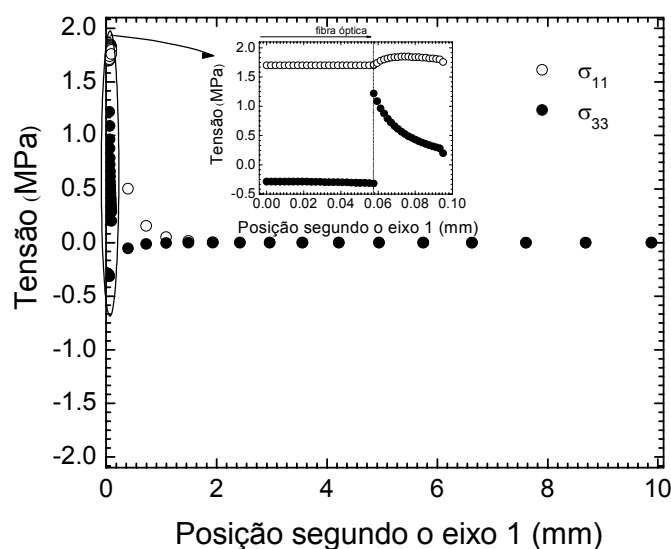


Figura 7.26 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material compósito segundo a largura do provete, eixo 1.

Numa observação mais pormenorizada segundo o eixo 3, pode-se presenciar as tensões existentes no material compósito, junto da fibra óptica e devido à presença desta.

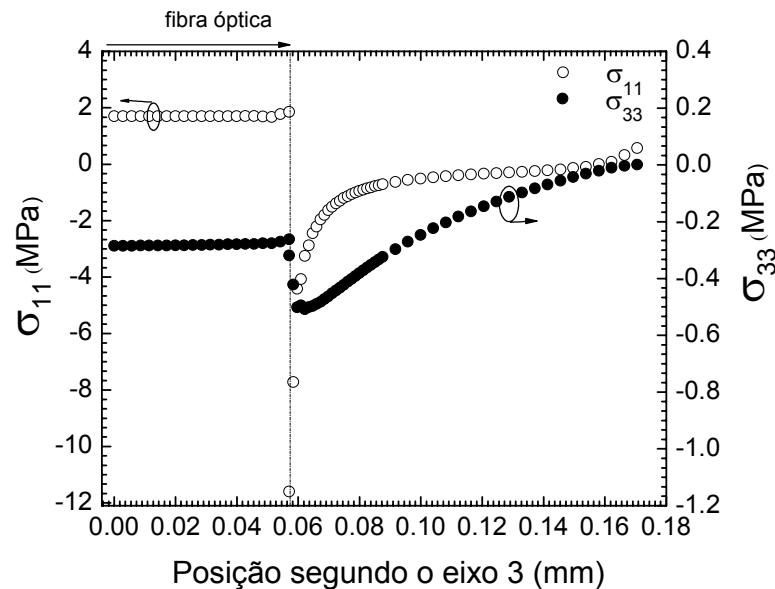


Figura 7.27 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material compósito segundo a espessura do provete, eixo 3.

Devido a contração do laminado observa-se uma certa compressão sobre a fibra óptica segundo a espessura, o que sendo uma distribuição uniforme poderá não causar grandes perturbações na rede de Bragg, caso contrário, poderiam surgir fenómenos como a birrefringência. No entanto, como pôde ser observado no capítulo 6, com a metodologia de embebimento foi possível evitar o aparecimento da birrefringência.

### 7.3.3 – Modelo numérico da placa sensora com a fibra óptica com revestimento

O modelo que se apresenta tem por objectivo observar a influência da presença do revestimento na fibra óptica na zona da rede de Bragg, durante um ensaio de tracção, com a possibilidade de observação de cargas transversais na zona da rede. Em termos experimentais foi verificado que, com a metodologia de produção ultimamente usada, as cargas transversais não influenciavam significativamente o espectro reflectido da rede de Bragg.

Do modo análogo ao procedimento anterior, é apresentado na figura 7.28, a geometria do problema considerado. Em relação ao problema anterior, foi acrescentado um revestimento envolvendo a fibra óptica, na zona da rede de Bragg, perfazendo um diâmetro exterior de  $250\ \mu\text{m}$ .

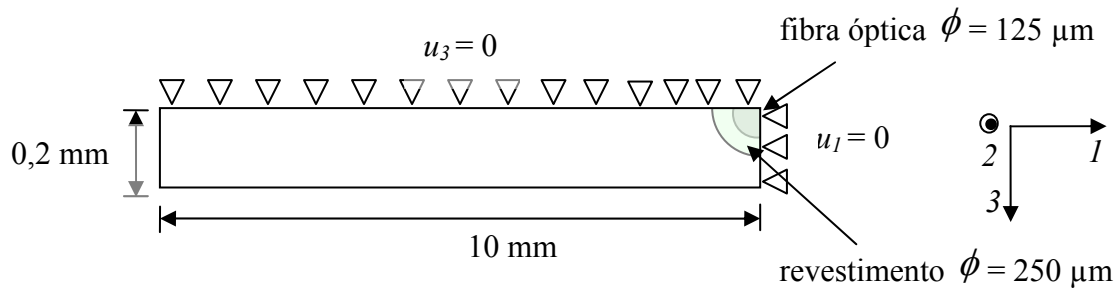


Figura 7.28 – Geometria e condições fronteira do modelo.

Na realização da malhagem da secção da placa sensora foram considerados 11280 elementos. A figura 7.29 mostra o tipo de malhagem implementado, com particular relevo para a zona do revestimento considerado em torno da fibra óptica.

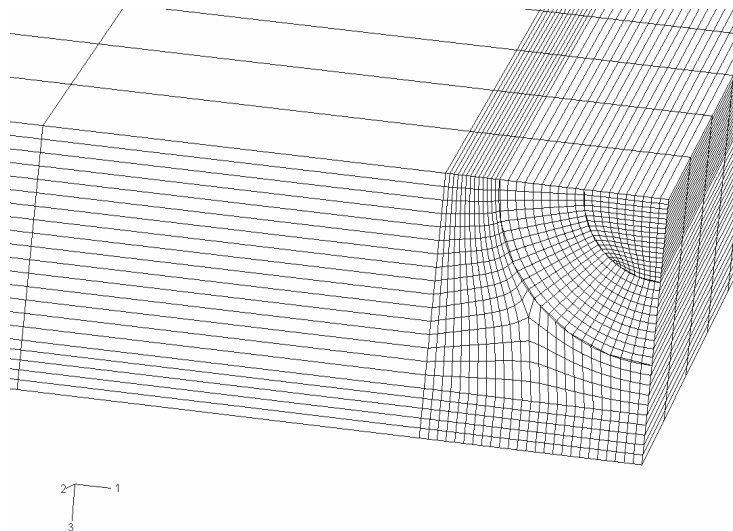


Figura 7.29 – Malhagem 3D da placa sensora com fibra óptica revestida.

Este provete foi também submetido ao mesmo carregamento que o anterior. Apesar da fibra óptica, na zona do sensor de rede de Bragg, ter um maior diâmetro, induz menores alterações dos campos de tensões, na figura 7.30 e figura 7.31 mostram-se as tensões na vizinhança da interface. A presença do revestimento permite diminuir substancialmente as tensões transversais directamente na fibra óptica. Observa-se perante os dados obtidos, um ligeiro esmagamento do revestimento considerado, figura 7.29.

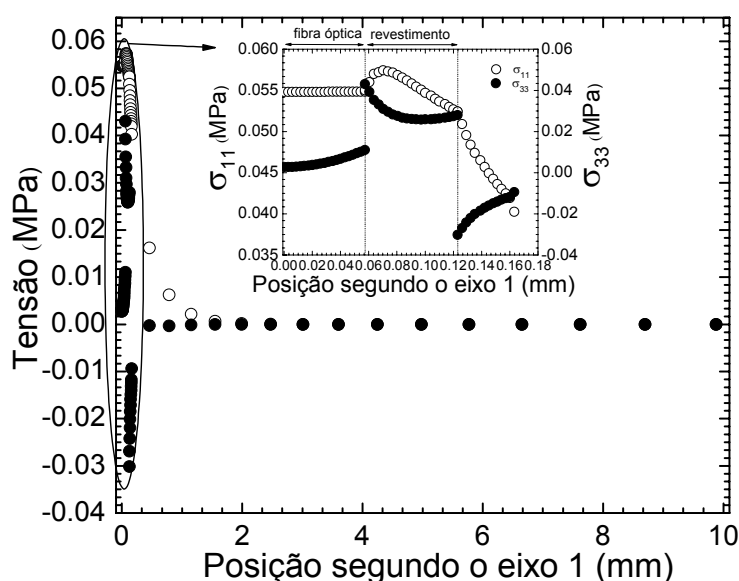


Figura 7.30 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material compósito segundo a largura do provete, eixo 1.

Segundo o eixo 3, da espessura, verifica-se uma ligeira compressão sucessiva, nas zonas das interfaces.

Os modelos desenvolvidos permitiram estimar as tensões induzidas na interface da fibra óptica com o material compósito, fazendo notar que a concentração de tensões é local, sendo a sua área de influência claramente determinada.



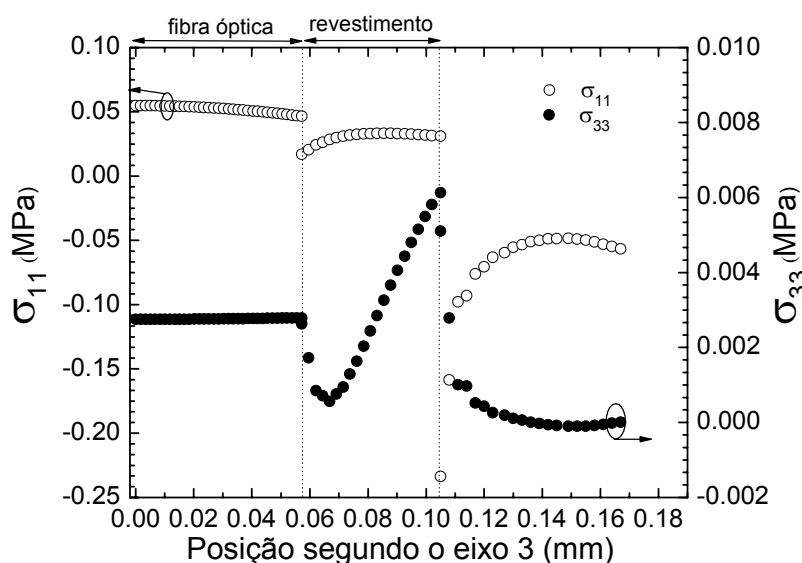


Figura 7.31 – Tensões na vizinhança da interface fibra óptica/material composto segundo a espessura do provete, eixo 3.

### 7.3.4 – Discussão/Conclusão

Verifica-se de facto que, com a utilização de um revestimento a fibra óptica em si, fica exposta a campos de tensões significativamente menores, para além das variações em termos relativos também serem menores. Isto também significa que a fibra se encontra mais protegida, ou seja, mais insensível às variações que possam ocorrer à sua volta, para além do facto da presença do revestimento introduzir uma interface que altera o carregamento da rede de Bragg por tensão de corte. Assim, dependendo do meio em que se vai realizar o embebimento deste tipo de sensores, poder-se-á optar por colocar ou não revestimento nas fibras ópticas, nas zonas da rede de Bragg. Para os materiais utilizados, com o tipo de entrelaçado da fibra de reforço usada, e para as placas sensoras laminadas, verificou-se experimentalmente que não há necessidade da utilização de revestimento na zona da rede de Bragg, isto para as medições realizadas, quer em temperatura, quer em deformação longitudinal, dada a maior sensibilidade que estas apresentaram, sem que se tenha detectado qualquer alteração significativa nos espectros obtidos por reflexão das redes. Há, assim, um compromisso entre a sensibilidade pretendida e a aplicação em vista para as placas sensoras.

## 7.4 – Comportamento da placa sensora em fibra de carbono/epóxico

### 7.4.1 – Comportamento em curvatura

O estudo foi realizado com a placa sensora laminada em fibra de carbono/epóxico, apresentada no capítulo 6, na figura 6.16, de dimensões reduzidas,  $50 \times 10 \times 0,4 \text{ mm}^3$  e foi submetida a diferentes raios de curvatura, desde os 40 mm até aos 100 mm. Foram utilizados discos cilíndricos com raios bem definidos, e confirmados com o auxílio de um palmer de resolução de 0,05 mm. Os espectros em reflexão correspondentes à variação do comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , foi registada, e os resultados obtidos são apresentados na figura 7.32.

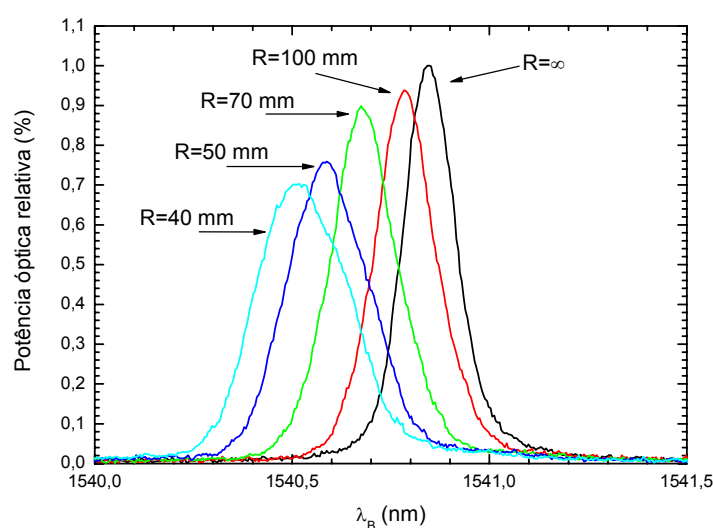


Figura 7.32 – Resposta espectral da rede de Bragg na placa sensora quando sujeita às diferentes curvaturas.

A resposta espectral obtida para as várias curvaturas permite verificar um desvio do pico central de  $\lambda_B$ , para menores comprimentos de onda, com diminuição do raio aplicado. Este deve-se à compressão do período da rede de Bragg que se encontra embebida no material, e que é originada pela aplicação de uma curvatura a qual

podemos designar como positiva. Se, contrariamente, fosse aplicada uma curvatura negativa, devia-se observar uma distensão da rede de Bragg e, conseqüentemente, um deslocamento do pico central para maiores comprimentos de onda.

Quando uma placa compósita sofre uma curvatura, com um raio bem definido,  $R$ , o comprimento de onda da rede de Bragg embebida irá alterar-se de acordo com a equação [243,244]:

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \frac{d}{R} + K_T \Delta T \quad (7.1)$$

Com  $K_\epsilon$  a sensibilidade à deformação da fibra, e  $K_T$  a sensibilidade à temperatura da fibra, podendo esta depender não só do coeficiente termo-óptico da fibra, mas também do coeficiente de expansão térmica do material compósito, o que no caso do carbono esse valor é sensivelmente zero, e  $d$ , é a distância do núcleo da fibra óptica à linha neutra da placa compósita. No caso dos ensaios realizados, o segundo termo da equação 7.1 é considerado zero já que estes foram realizados numa sala climatizada e, por conseguinte, sem variações de temperatura considerável.

Com o desvio do comprimento de onda de ressonância de Bragg com a curvatura observam-se dois efeitos, que podem ser indesejáveis mas que estão relacionados, a diminuição da potência óptica e o alargamento do espectro. Uma possível razão para estes dois fenómenos observados, poderá estar no facto de a curvatura induzir uma modulação espacial no período da rede de Bragg, cujo efeito reflecte-se imediatamente na largura do espectro e, conseqüentemente, na sua potência óptica. No entanto, a largura do espectro, possivelmente mais tarde com a progressão na largura, acarreta consigo um desdobramento do pico central, surgindo a birrefringência. A variação do  $\lambda_B$  como função do raio de curvatura e com o seu inverso são representados na figura 7.33, permitindo desta forma realizar a calibração da placa sensora.

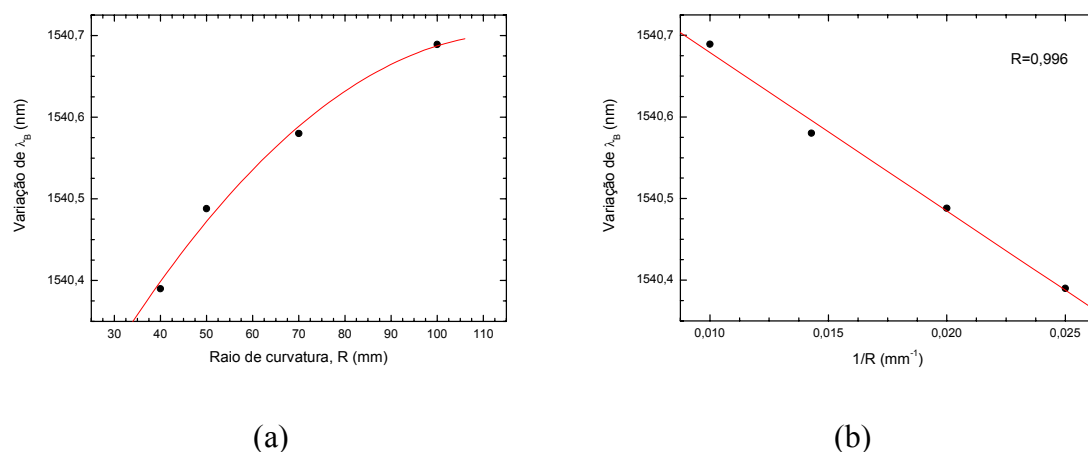


Figura 7.33 – (a) Resposta da variação da rede à curvatura imposta na placa.  
(b) Tendência linear da rede de Bragg com o inverso da curvatura.

O efeito do alargamento do espectro e o desdobramento do pico de ressonância de Bragg, não são efeitos desejáveis porque induzem leituras erradas da deformação. Estes, no entanto, podem ocorrer devido à simetria da placa sensora apresentada, em que a fibra óptica deve estar posicionada sensivelmente na linha neutra da placa laminada. No entanto, com esta apresentação pretende-se mais uma vez realçar o bom embebimento conseguido em placas laminadas compósitas finas, com o consequente “bom” comportamento da rede de Bragg. Caso se tivesse partido para a elaboração de um potencial sensor de curvatura, então estes efeitos teriam de se ter em linha de conta e, consequentemente, arranjar algumas soluções para os eliminar. Desde deslocalizar a fibra óptica da linha neutra do material até à criação de zonas localizadas de tensões internas que possam interagir com a rede de Bragg, de forma a provocar um comportamento mais linear em curvatura, traduzindo-se num desvio da sua resposta espectral essencialmente sem alargamento do espectro.

No comportamento evidenciado pela placa sensora, verifica-se uma certa linearidade da rede de Bragg, principalmente quando se faz a representação da sua variação com o inverso da curvatura, tal como é representado na figura 7.33(b), podendo assim relacionar a curvatura a que uma estrutura possa estar sujeita, em função da variação do comprimento de onda da rede de Bragg.

### 7.4.2 – Comportamento a um carregamento transversal

A aplicação de carga transversal a uma rede de Bragg gera uma deformação transversal/longitudinal que induz um desvio na ressonância de Bragg. A placa sensora sujeita ao estudo tem as dimensões  $50 \times 10 \times 0,4 \text{ mm}^3$ . A força é aplicada conforme ilustra a figura 7.34, ou seja, ela é aplicada na zona do sensor, numa extensão de 20 mm, com 10 mm de largo, nos quais deve estar a rede de Bragg, algures a meia distância. O posicionamento exacto é difícil saber. No entanto, foi feita uma boa aproximação, com recurso à sensibilidade que a rede de Bragg tem à variação com a temperatura.

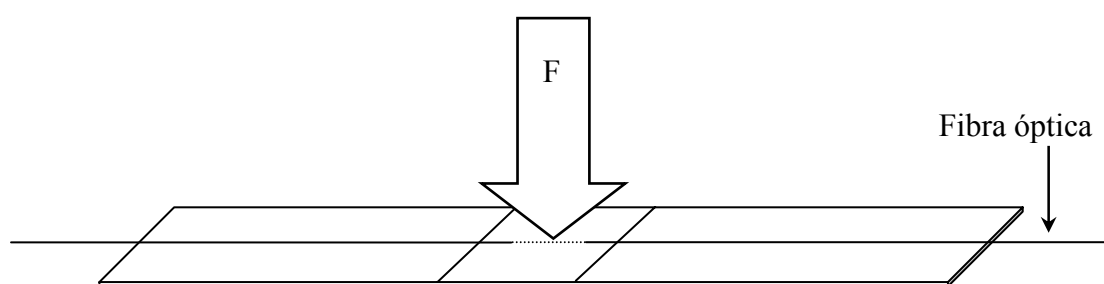


Figura 7.34 – Posicionamento das cargas aplicadas à placa sensora.

A rede de Bragg é sensível à aplicação de carga transversal embora não tenha um comportamento linear em relação a esta grandeza. Podem-se verificar fenómenos como a histerese, dado que têm origem na resposta do revestimento polimérico às massas aplicadas, porque este material não acompanha com rapidez as variações de carga.

Na figura 7.35, pode-se observar o deslocamento da ressonância de Bragg, para as cargas aplicadas entre zero e os 2000 g, com incrementos de 500 g. As alterações verificadas na potência óptica não são muito significativas, não se verificando um abaixamento desta, podendo ser devido à extensão que a fibra óptica sofre devido às massas que pressionam o material como um todo, o que provoca o alongamento do período da rede de Bragg.

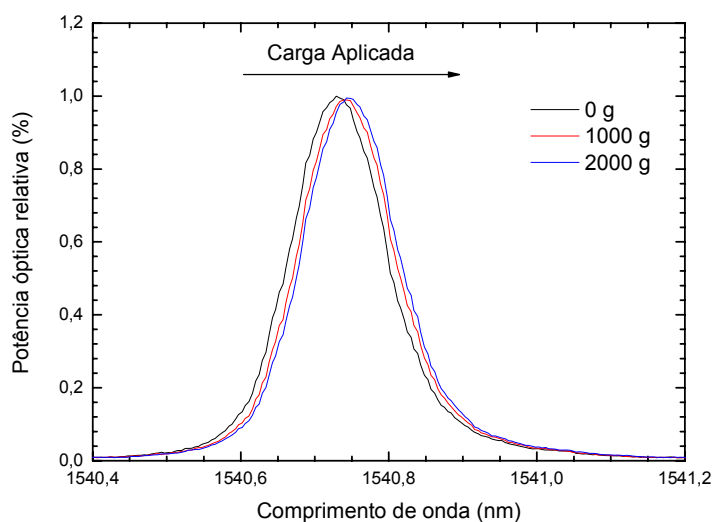


Figura 7.35 – Resposta espectral da rede de Bragg às solicitações da carga transversal aplicada.

Como se pode observar pela resposta espectral obtida, esta não é muito sensível à aplicação de cargas transversais de baixo valor. Isto acontece porque a fibra óptica encontra-se embebida num material compósito em fibra de carbono/epóxico, e para que se verifiquem alterações significativas no comprimento de onda, as cargas empregues teriam que atingir valores bem mais elevados do que as que foram usadas. Muito possivelmente este tipo de ensaios daria outros resultados se o material usado na placa sensora fosse em resina de epóxico, por exemplo. Dada a maior flexibilidade da resina, obteria uma maior sensibilidade à pressão, mas em termos de placa sensora, haveria uma perda com um aumento do coeficiente de expansão térmico do material utilizado.

### 7.4.3 – Comportamento a altas temperaturas

Uma placa sensora em fibra de carbono/epóxico, com as dimensões  $110 \times 30 \times 0,4$  mm<sup>3</sup>, foi sujeita a um ensaio com particular interesse, devido às suas características, nomeadamente, devido ao coeficiente de expansão térmico do material. Assim, pretendeu-se verificar como varia o comprimento de onda de ressonância de uma rede de Bragg, quando está embebida neste tipo de material compósito, e este sujeito a uma variação de temperatura.

O sistema utilizado para a interrogação e análise comportamental da rede de Bragg em função da temperatura, foi o primeiro set-up montado, que se apresentou na figura 5.6(b). O registo dos dados foi efectuado através do analisador de espectros óptico, OSA. Os ensaios foram realizados com a colocação da placa sensora numa estufa com controlo de temperatura, iniciando-se aos 40°C com incrementos de 10°C até aos 100°C. Os valores obtidos para a variação do  $\lambda_B$ , com o comportamento do sensor óptico embebido na placa sensora, em função das variações de temperatura impostas, pode ser observado no gráfico da figura 7.36.

As leituras de temperatura foram realizadas com o auxílio de um termopar de tipo K sendo a informação do mesmo gravada por um sistema de aquisição para termopares da FLUKE®.

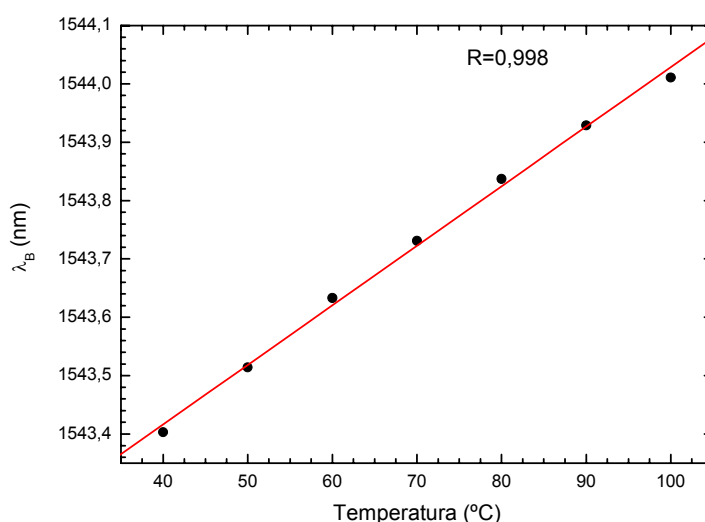


Figura 7.36 – Variação com a temperatura de uma rede de Bragg embebida numa placa sensora em fibra de carbono/epóxico.

Na observação da variação do comprimento de onda da ressonância da rede de Bragg embebida, verifica-se que houve uma variação de 0,6 nm na localização do  $\lambda_B$ . Este facto evidencia que a variação registada pelo sensor óptico, é devida só à influência que esta variação da temperatura tem sobre a rede de Bragg. Logo o material anfitrião não induz qualquer alteração nessa variação, razão pela qual estas placas sensoras se

tornam tão atractivas, uma vez que se pode considerar o parâmetro da temperatura como uma constante no comportamento da placa sensora.

Assim, a fibra óptica teve um comportamento independente do material em que estava embebida, que com um coeficiente de expansão térmico praticamente nulo, ou mesmo negativo não interfere com o comportamento da fibra óptica, sempre que haja alguma alteração de temperatura. Sendo particularmente interessante para muitas das aplicações em estruturas que estão expostas ao tempo, e com isto significa dizer, às variações térmicas diurna/nocturna, a que os materiais possam estar sujeitos, como por exemplo, no controlo do aparecimento de gelo numa estrada de montanha.

A placa sensora foi ainda submetida a vários ensaios de carga com variação da temperatura, nestes novos ensaios foi sujeita à carga máxima imposta de 1000 N. A velocidade de deslocamento, na aplicação da carga na máquina de ensaios foi de 0,1mm/min. As cargas aplicadas à placa foram realizadas a cada uma das temperaturas consideradas precedentemente. Na figura 7.37 apresenta-se o comportamento da placa em função da carga e das temperaturas aplicadas.

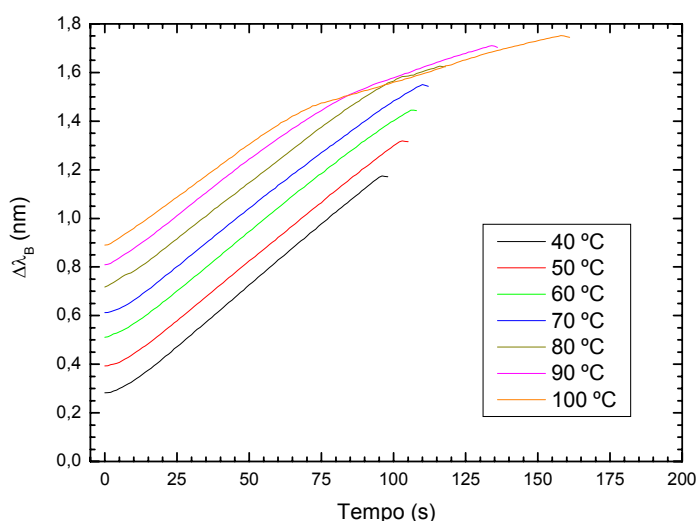


Figura 7.37 – Comportamento da placa sensora em fibra de carbono/epóxico, a uma carga aplicada de 1000 N, com a temperatura.



Observa-se assim que a placa sensora tem um comportamento que se pode considerar homogéneo até à temperatura de 70 °C. A partir dessa temperatura e para valores próximos da carga máxima aplicada, verifica-se uma ligeira perturbação no comportamento do sensor óptico. Verifica-se que independentemente da temperatura a que a placa está sujeita, quando o sensor óptico embebido regista uma variação no  $\lambda_B$  de aproximadamente 1,45 nm de variação, quer seja por deformação longitudinal, quer seja pelo aumento de temperatura conjugado com a deformação longitudinal, o sensor não responde correctamente às solicitações a que está sujeito.

Os dados da figura 7.37 mostram claramente as limitações do sistema de interrogação e aquisição da rede de Bragg usado. Ou melhor, os cuidados que se devem ter na escolha da localização espectral dos sensores, tendo em vista as aplicações pretendidas e, conseqüentemente, o equipamento a usar, para que não se ultrapasse o limite permitido pela janela do filtro óptico usado pelo sistema de interrogação, nas medições das variações ocorridas com a rede de Bragg. Foi observado que este sistema, possui uma janela de 4 nm de amplitude, a partir da qual não se deve variar o comprimento de onda da rede, sob o risco dos resultados serem enganadores.

## **7.4.4 – Ensaaios com rotação da placa sensora**

### **7.4.4.1 – Introdução**

A placa sensora em fibra de carbono/epóxico, com as dimensões 110×30×0,4 mm<sup>3</sup>, foi sujeita a uma variação angular em torno do seu maior eixo, tal como se esquematiza na figura 7.38. Estes ensaios resultam da observação realizada à placa sensora, quando se procedia à realização dos ensaios de tracção na máquina de ensaios. Observando-se na altura que, após efectuar a fixação da placa a uma das garras da máquina de ensaios, verificava-se que ao apertar a segunda, havia uma variação do comprimento de onda da rede, e que esta variação era reduzida a zero pelo ajuste da placa para a posição inicial. Foi observado que estas variações eram reprodutíveis. Situação que culminou com as observações que se apresentam, embora com resultados que podem ser considerados qualitativos, dado que não foi possível efectuar variações

de grau em grau, mas somente de 5° em 5°. No entanto, estas dão uma boa indicação, para se efectuar um trabalho mais estruturado no futuro, com vista a obtenção de um sensor de pequenas rotações, para estruturas.

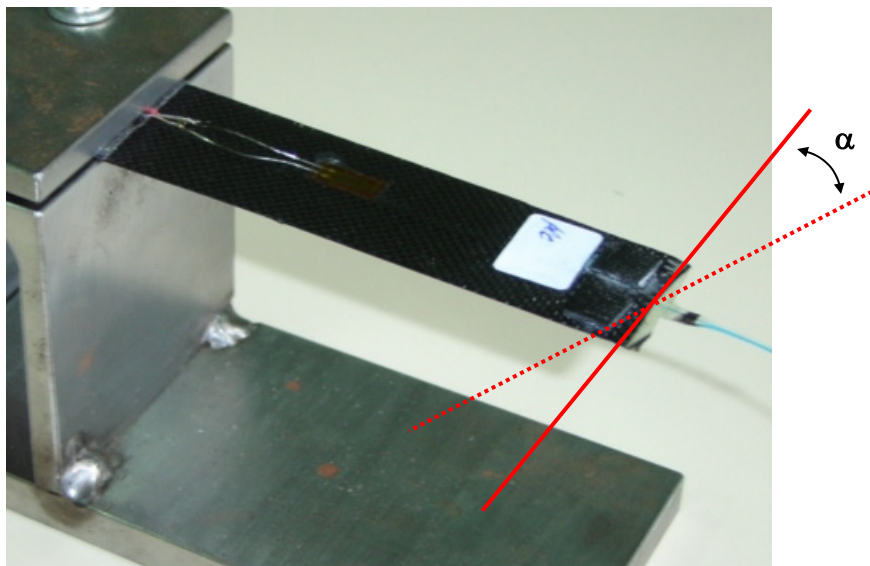


Figura 7.38 – Esquema da rotação aplicada, com  $\alpha$  a variar entre os 0° e 20°.

A interrogação da fibra óptica foi realizada com o primeiro set-up montado, tal como se apresenta na fotografia da figura 5.6(b). A leitura do ângulo foi realizada com o auxílio de um transferidor, que embora possua como menor divisão o grau, não permite uma boa precisão de leitura para essa gama de valores. Tal como anteriormente referido, este ensaio pretende ser mais uma contribuição para as potencialidades dos sensores em fibras ópticas quando embebidos em materiais compósitos.

#### 7.4.4.2 – Variação angular da placa sensora

Aplicou-se à placa sensora uma pequena rotação, realizada em torno do seu maior eixo de acordo com a figura 7.38. O ensaio demonstrou uma reprodutibilidade de resultados, que se entendeu por bem apresentar, dada a possibilidade real de ao aprofundado melhor o mecanismo este poder ser usado como um elemento sensor, para determinar a rotação de uma estrutura compósita. É possível verificar uma razoável

amplitude na variação dos valores do  $\lambda_B$ . Os dados do sensor da rede de Bragg foram obtidos através do primeiro set-up montado (capítulo 5).

Na figura 7.39, está representada a variação do comprimento de onda em função do ângulo aplicado à placa quando a esta se aplica um ângulo de 5° em 5° até se atingir os 20°, no sentido dos ponteiros do relógio. No sentido contrário, os valores são sensivelmente os mesmos, mas com progressão inversa.

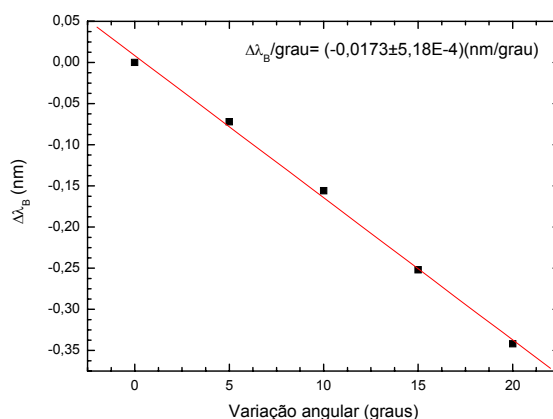


Figura 7.39 – Variação de  $\lambda_B$ , em função do ângulo aplicado, para a placa sensora.

A aplicação de uma rotação numa extremidade da placa sensora em torno do eixo que contém a fibra óptica, demonstrou que existe uma reprodutibilidade de resultados, comprovando que o comportamento da rede neste movimento é sempre o mesmo e perfeitamente quantificável. No entanto, ainda não é possível dissociar a variação do  $\lambda_B$ , de uma outra grandeza física que lhe seja aplicada, dado que, podem-se obter os mesmos resultados numéricos e, no entanto, a grandeza física que lhes deu origem ser completamente diferente. Assim, haverá necessidade de encontrar mecanismos que permitam dissociar os resultados em função das acções que estão na sua origem, sendo esse o grande desafio ao utilizar os sensores de rede de Bragg em fibra óptica.

#### 7.4.4.3 – Variação angular da placa sensora com taxa de aquisição elevada

Por fim, a placa sensora anterior foi ainda sujeita a ensaios com pequenos movimentos angulares, utilizando o último sistema de interrogação e aquisição óptico, com uma taxa de aquisição elevada, na ordem dos 1 kHz. Situação que levou à observação dos comportamentos que se mostram nas figuras seguintes.

As observações que se apresentam foram possíveis de realizar apesar da fase já muito adiantada do trabalho, tendo em vista “a visualização” do comportamento da placa quando sujeita às pequenas variações angulares, capaz de evidenciar alguns dos comportamentos internos, na relação entre as fibras de reforço e a fibra óptica, que de uma outra forma poderiam não ser perceptíveis. No entanto, com taxas de aquisição tão elevadas o sistema de interrogação introduz uma grande flutuação de sinal em torno de um determinado valor médio.

Na figura 7.40, apresentam-se os resultados obtidos quando a placa é rodada no sentido dos ponteiros do relógio até aos 20°, segundo o seu maior eixo, e depois retoma a posição inicial de 0°, sendo em seguida repetido o ciclo. Na figura apresentam-se quatro ciclos completos.

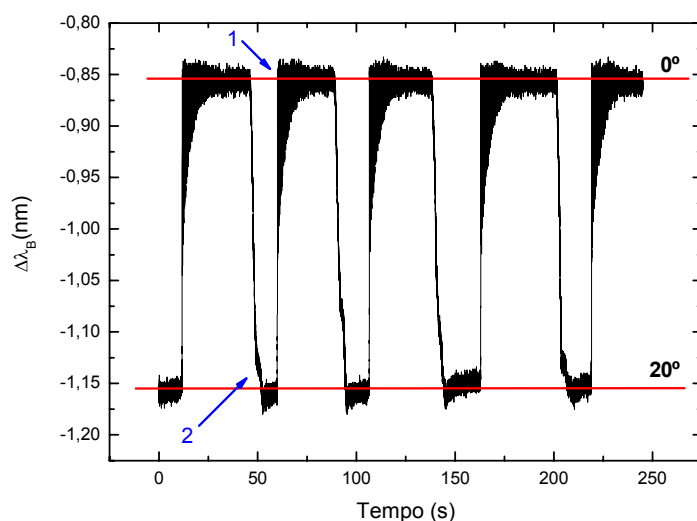


Figura 7.40 – Comportamento da placa quando sofre uma rotação rápida dos 0° aos 20°

Como se pode observar pelo gráfico anterior, iniciou-se a obtenção de dados com a rotação a 20° como valor inicialmente implementado, iniciam-se as leituras entre os dois patamares, 0° e 20°, permanecendo alguns segundos em cada um deles. Assinalam-se duas zonas na figura 7.40, uma como sendo a zona 1, em que se verifica o retorno da placa à posição de 0°, a qual parece denotar um certo relaxamento das tensões internas do material, em função do movimento rápido, por forma a provocar alguma flutuação do sinal óptico, até quase estabilizar. Isto acontece, muito provavelmente, por haver alguma dificuldade por parte do sensor óptico em reagir rapidamente à solicitação ou, então, alguma dificuldade do campo de tensões à sua volta em transferir essa carga na totalidade para o sensor. Na zona assinalada com um 2, verifica-se perfeitamente a aproximação mais lenta da marca dos 20°, pelo facto de ser feito manualmente, ao atingir este ângulo os valores obtidos parecem mostrar algum relaxamento das tensões do material.

Apesar das flutuações de sinal observadas, dada a taxa de aquisição, pode-se ver na figura 7.41, o comportamento da placa quando solicitada a movimentos mais lentos e com uma variação angular de 5° em 5°. Este comportamento foi completamente reprodutível, e uma vez largada a placa esta retorna à posição e aos valores iniciais.

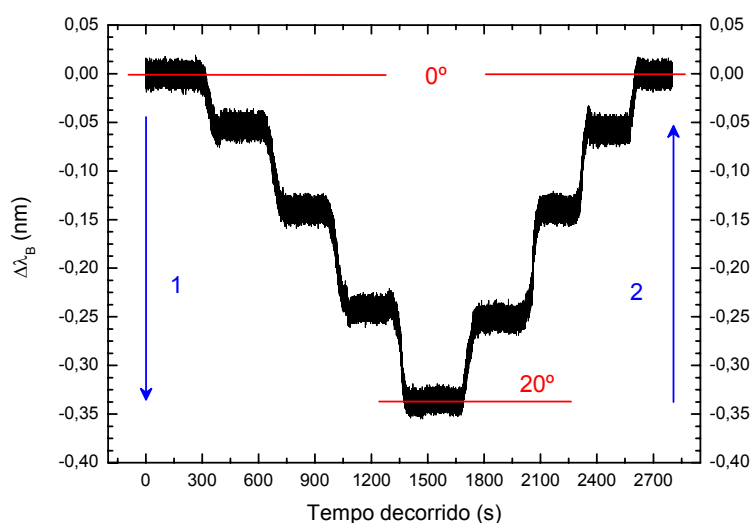


Figura 7.41 – Comportamento da placa quando sofre uma rotação de 5° em 5°. Sentido horário (1), sentido anti-horário (2).

O movimento imposto à placa sensora foi no sentido do movimento dos ponteiros do relógio, manualmente, este movimento traduz o sentido da seta indicada com o número 1. No entanto, se fosse no sentido anti-horário, no sentido da seta com a indicação do número 2, a situação efectuava-se no sentido inverso. Estas observações permitem dizer qual foi a rotação que a placa sofreu e em que sentido.

#### **7.4.4.4 – Discussão do comportamento angular da placa sensora**

Apesar dos ensaios em variação angular realizados à placa sensora laminada serem globalmente qualitativos, no sentido em que não foram utilizados dispositivos muito rigorosos para a medição angular imposta, eles permitem algumas observações, que se prendem, essencialmente, com a potencialidade de utilizar estruturas compósitas laminadas com espessuras da ordem dos 400  $\mu\text{m}$ , ou menos, dependendo do material utilizado, com a possibilidade de observar qual a “rotação” sofrida por uma estrutura maior, na qual a placa seja implementada, quer por colagem, quer por embebimento.

Para a elaboração deste tipo de placas sensoras, poder-se-ia recorrer a materiais mais flexíveis, como é o caso da resina de epóxico, ou mesmo de fibra de vidro/epóxico. No entanto, pelas razões já anteriormente apontadas, dado o coeficiente de expansão do material nas potenciais aplicações, esse parâmetro tem de ser ponderado.

## **7.5 – Aplicação de uma placa sensora como sensor de deformação longitudinal**

### **7.5.1 – Introdução**

O estudo realizado com a placa seguinte teve como motivo averiguar a influência que pode ter uma placa sensora laminada, com espessura e dimensões reduzidas, quando comparadas com a estrutura a monitorizar, no comportamento desta, mesmo que de uma

forma localizada. Assim, foi realizado, paralelamente, um estudo por análise de elementos finitos, FEM, no sentido de averiguar o comportamento de ambas as estruturas, da estrutura a monitorizar e da placa sensora.

Pretendeu-se, assim, fazer uma avaliação das performances dos sensores em rede de Bragg, quando embebidos em placas compósitas, cujo propósito final é serem usadas fundamentalmente como sensor de deformação de uma estrutura, na qual a placa sensora é colada.

No entanto, verificou-se que os sensores em rede de Bragg, são mais comuns de se encontrarem colados às estruturas a monitorizar, recorrendo a adesivos, ou fitas adesivas à base de poliamidas e, por conseguinte, não é também raro encontrar estes sensores partidos, mesmo antes do início das monitorizações, ou mesmo durante a sua curta vida em serviço. Isto tem uma ocorrência mais ou menos corrente devido à natureza mais frágil da sílica. Assim, desta forma, com o embebimento numa placa compósita pretende-se garantir essa protecção aos sensores em fibras ópticas.

Neste ponto foi, assim, feita uma análise experimental e numérica, para melhor se compreender os comportamentos de uma placa sensora em fibra de carbono, fundamentalmente, como sensor de deformação longitudinal.

A placa sensora em fibra de carbono/epóxico foi colada a uma placa em fibra de vidro e esta é submetida a ensaios de deformação longitudinal. As suas respostas às deformações foram registadas e comparadas com os valores obtidos por seis extensómetros eléctricos posicionados em zonas consideradas relevantes, figura 7.42.

### **Placas ensaiadas**

A estrutura a monitorizar é feita em tecido equilibrado, com 50% do tecido na direcção a 0° e 50% na direcção a 90°, de fibra de vidro E. A estrutura foi impregnada com resina de epóxico, pelo processo de impregnação manual, sendo assistida por vácuo no processo de cura a uma pressão de  $85 \times 10^3 \text{ N/m}^2$  (0,85 bar). As dimensões da placa em estudo são  $300 \times 50 \times 3,3 \text{ mm}^3$ .

A placa sensora foi realizada em tecido “twill” 2/2, de fibra de carbono pré-impregnada em resina de epóxico. As dimensões da placa sensora são,  $100 \times 20 \times 0,4 \text{ mm}^3$ , com realização em autoclave, cuja metodologia já foi apresentada anteriormente.

### 7.5.2 – Ensaios realizados às placas

A aquisição, processamento e gravação de dados obtidos pela leitura da rede de Bragg foram realizados através do quarto set-up, descrito anteriormente no capítulo 5. Os valores obtidos pelos seis extensómetros colados à superfície da estrutura ensaiada e também sobre a placa sensora foram processados pelo Spider8, da HBM®. A sua disposição nas placas é apresentada na figura 7.42, assim como a sua montagem na máquina de ensaios.

A monitorização da placa de testes foi realizada à temperatura de  $23^\circ\text{C}$ , numa sala climatizada, e com uma humidade relativa de 50%. Os ensaios de tracção foram realizados na INSTRON®. A velocidade de deslocamento das garras foi de  $0,1 \text{ mm/min}$ .

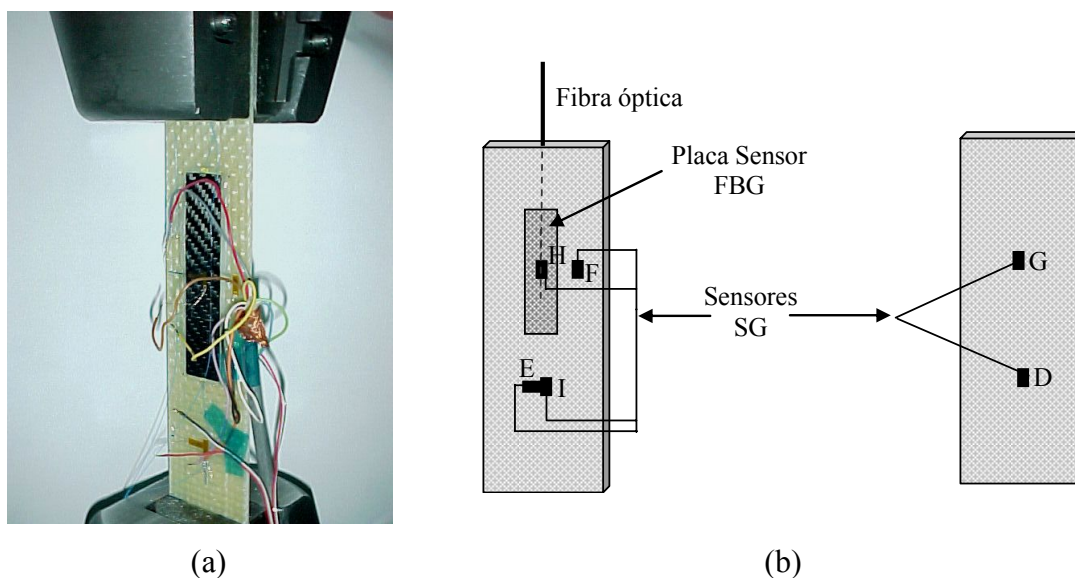


Figura 7.42 – (a) Set-up na máquina de ensaios. (b) Posicionamento dos sensores na frente e verso da placa de ensaios.



A resposta do extensómetro colocado na posição H foi usada como termo de comparação com a rede de Bragg embebida na placa sensora, permitindo dessa forma também verificar por comparação com os outros sensores eléctricos e qual a real influência da placa sensora sobre a estrutura a ensaiar.

Na figura 7.43 mostra-se a concordância dos comportamentos entre o sensor eléctrico e o sensor óptico aquando da fixação da placa de ensaios na máquina de testes. Podem-se observar todas as fases de fixação das garras, assim como o decorrer do ensaio realizado, e mesmo a relaxação natural que ocorre após o ensaio, por parte da máquina de ensaios.

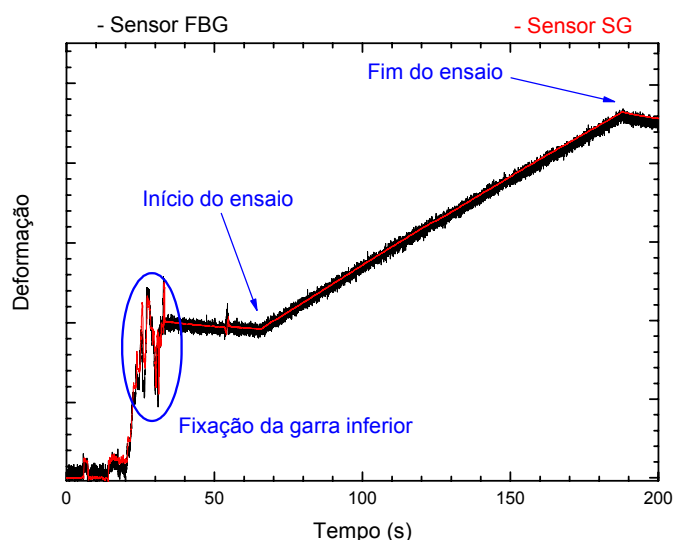


Figura 7.43 – Comportamento dos dois sensores durante a fixação e de um ensaio realizado à placa de teste.

Após a realização de vários ciclos de carga, foram obtidas as respostas para os sensores eléctricos e para o sensor óptico, cujos resultados são apresentados na figura 7.44. Verifica-se alguma similaridade entre os registos dos sensores, nomeadamente em relação à posição H, cujos valores são quase coincidentes. Na comparação entre o sistema óptico e eléctrico verifica-se uma maior flutuação dos valores do sistema óptico, que é devido à elevada taxa de aquisição do sistema, 500 Hz, em comparação com os 100 Hz do sistema eléctrico. Por natureza, o sistema óptico sempre apresentou uma

maior flutuação nas aquisições realizadas. No entanto, se forem calculados valores médios essa flutuação é reduzida.

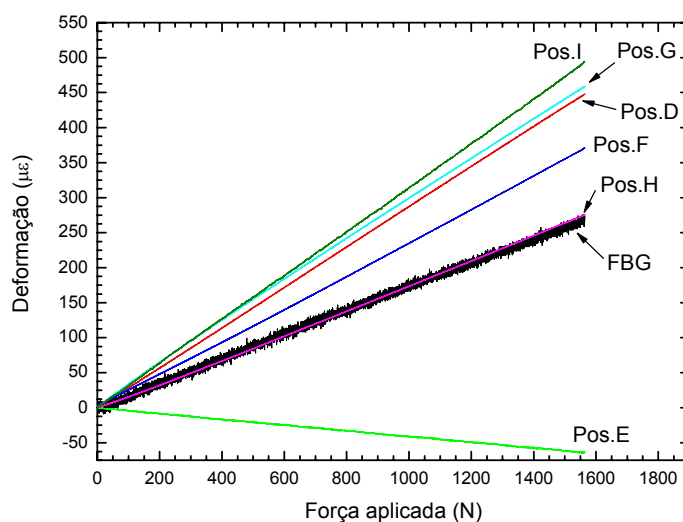
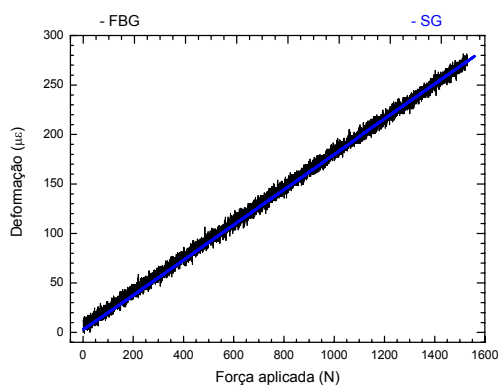
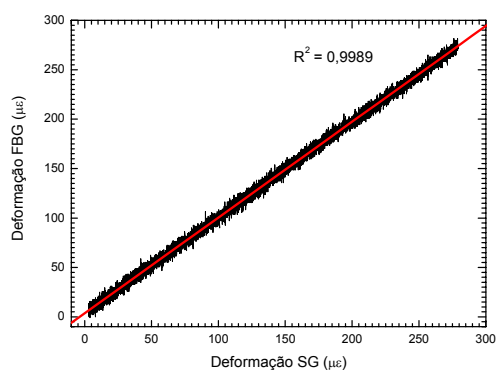


Figura 7.44 – Deformações obtidas pelos diferentes sensores em função da força.

Na figura 7.45 apresenta-se a correlação entre as respostas dos sensores eléctrico e óptico, quando da realização dos ensaios. Tal comprova o bom desempenho de ambos durante a realização experimental e às solicitações impostas, na posição H.



(a)



(b)

Figura 7.45 – (a) Relacionamento entre os sensores em função da deformação.

(b) Correlação entre as deformações obtidas pelos dois sensores.

A deformação longitudinal da placa sensora compósita laminada foi medida pelos seis extensómetros de deformação. Sendo apresentada uma comparação entre as deformações obtidas com a rede de Bragg e os extensómetros, quando o conjunto é sujeito a uma carga longitudinal, para além de efectuar uma comparação com a análise por elementos finitos, numa análise tridimensional.

### 7.5.3 – Análise por elementos finitos

O modelo numérico foi realizado pelo método de elementos finitos, o qual consistiu em verificar o comportamento da placa sensora quando colada na superfície de um provete em fibra de vidro/epóxico. A análise foi realizada através do software comercial ABAQUS<sup>TM</sup>. Na construção da malhagem das placas laminadas foram usados elementos 3D hexaédricos com 20 nós. Além disso, foi também considerado que a fibra óptica e as placas laminadas têm um comportamento elástico, que os materiais são considerados homogéneos, e que foram considerados deslocamentos e campos de tensão pequenos.

Para o modelo foram consideradas as propriedades mecânicas apresentadas na tabela 7.1. Devido ao facto que, no ensaio experimental realizado, a placa sensora não ter sido colada exactamente ao meio do provete e de as condições fronteiras do provete não serem as mesmas nas duas extremidades do provete, figura 7.46, as condições de simetria não foram utilizadas para simplificar o modelo. O provete em fibra de vidro/epóxico foi considerado encastrado numa das extremidades, e a força foi aplicada na outra extremidade na direcção do comprimento. A aproximação considerada é bastante similar ao caso real. A força máxima aplicada ao provete em fibra de vidro/epóxico foi de 1600 N, o que corresponde à força máxima aplicada experimentalmente durante os ensaios realizados.

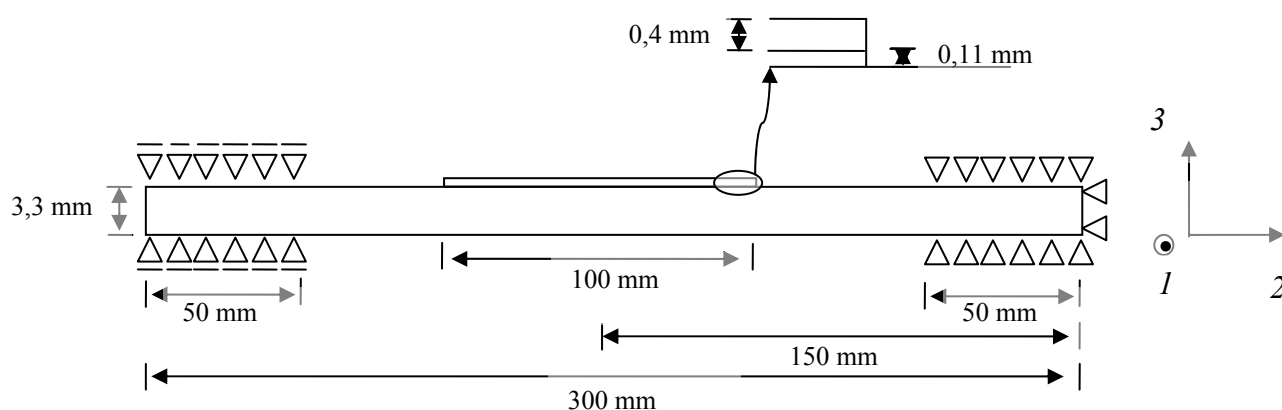


Figura 7.46 – Geometria e condições de fronteiras consideradas.

A malhagem da secção considerada do conjunto placa sensora e provete foi realizada a partir de 16704 elementos C3D20R, a malhagem implementada assim como o posicionamento da placa sensora, são representados na figura 7.47.

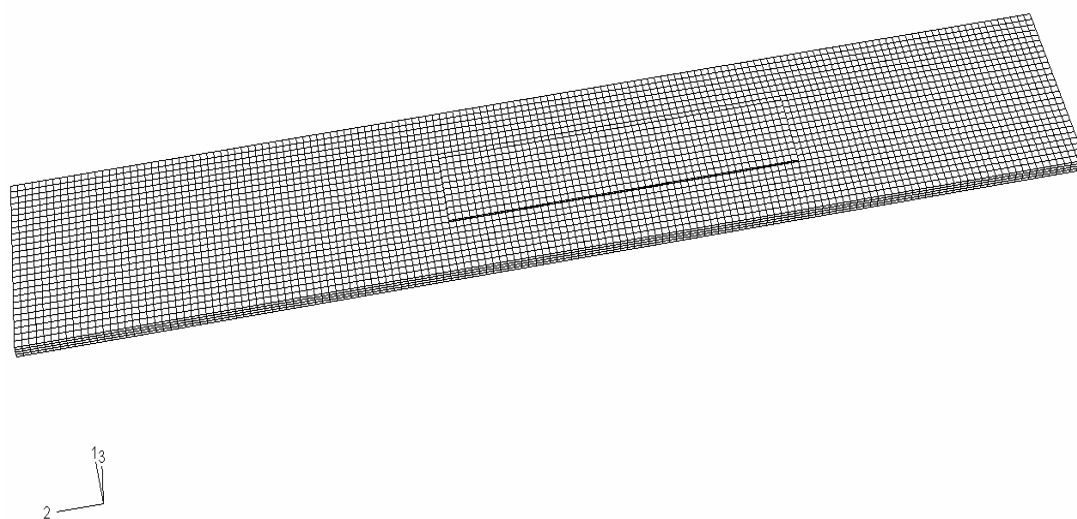


Figura 7.47 – Malhagem do conjunto placa sensora e placa de compósito vidro/epóxico.

Nas figuras 7.48 e 7.49, apresentam-se os valores da deformação longitudinal, calculados pelo modelo, na direcção do comprimento. A representação da curvatura imposta pela placa sensora foi ampliada 20 vezes para melhor visualização da sua influência sobre o comportamento mecânico do provete de fibra de vidro/epóxico. Estas representações permitem sublinhar o efeito de reforço que a placa sensora provoca no

lado do provete em que está colada, fazendo com que haja uma ligeira flexão do provete em fibra de vidro/epóxico.

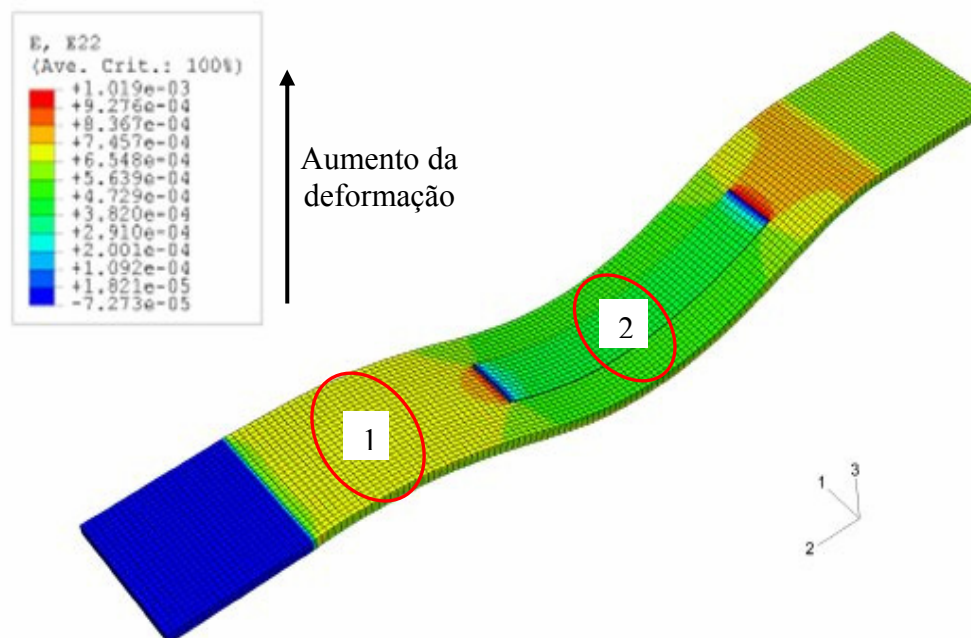


Figura 7.48 – Representação do campo de deformações obtido por simulação, no lado da placa sensora colada.

Na figura 7.48, identificam-se duas zonas marcadas com a numeração 1 e 2. Estas duas zonas apresentam-se com campos de deformação bem diferenciados. O que vem de facto reforçar a ideia da influência da placa sensora quando colada numa estrutura em monitorização, em que esta estrutura, embora possua uma espessura relativamente maior do que a placa sensora, cerca de 8,25 vezes superior, é perfeitamente influenciável pela sua presença.

Verifica-se, assim, que as deformações são superiores fora da zona em que se encontra a placa sensora colada, caso da zona 1, comparativamente com a zona 2, em que se tem um campo de deformação mais baixo. Situações que se inverte quando se faz uma visualização no lado contrário do provete de ensaios, figura 7.49. As maiores deformações são registadas na zona de maior flexão, lado oposto à colagem da placa sensora.

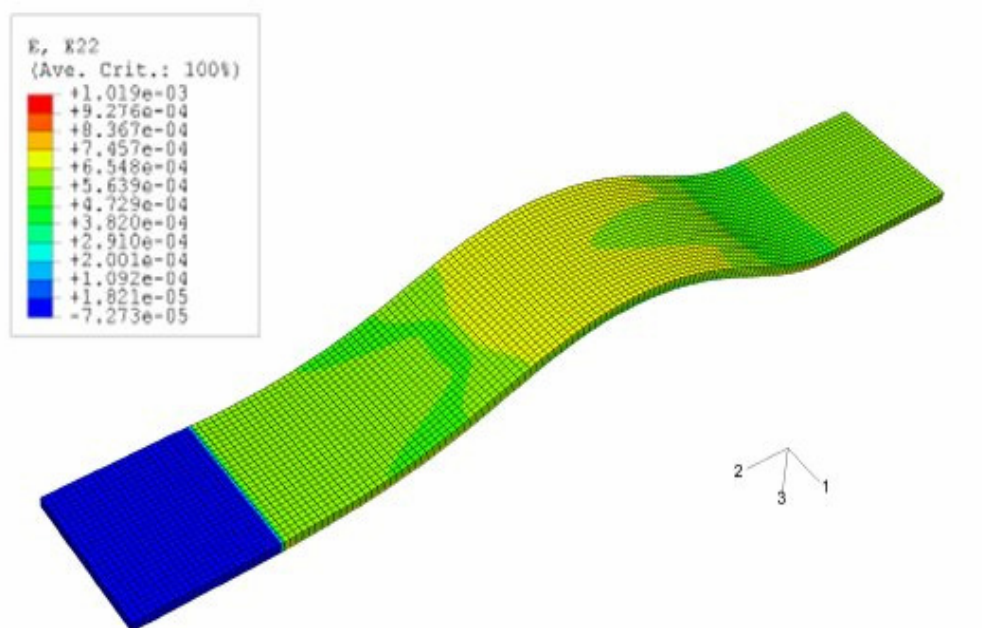


Figura 7.49 – Representação do campo de deformação calculado por análise de elementos finitos, no lado contrário a aplicação da placa sensora.

Na figura 7.50 é representada a curvatura imposta (i.e.  $u_3$ : deslocamento na espessura) ao longo do provete pela presença da placa sensora. Estes valores foram obtidos através do modelo numérico. Quatro placas sensoras foram consideradas, uma de resina de epóxico, outra de fibra de vidro/epóxico, e finalmente duas de fibra de carbono/epóxico, em que uma destas tem dimensões reduzidas. Os valores obtidos confirmam que a placa sensora de carbono/epóxico impõe uma maior curvatura que os outros casos considerados, figura 7.50. Todavia, o seu efeito pode ser diminuído significativamente, se forem reduzidas as dimensões da placa, tal como se verificam na figura.

Observou-se assim que a placa sensora de maiores dimensões era a que obrigaria a uma maior curvatura. Pela análise numérica pode-se também observar que a placa sensora de carbono/epóxico de dimensões reduzidas, teria uma influência na curvatura mais localizada.

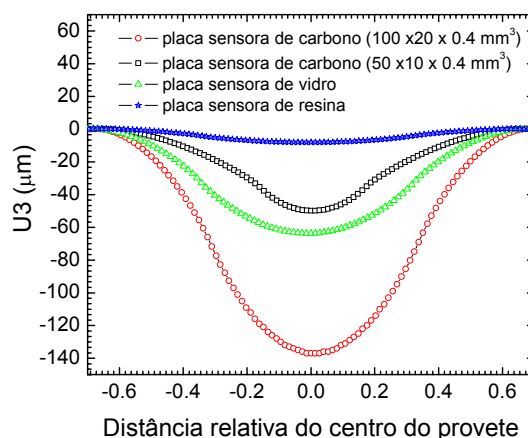


Figura 7.50 – Curvaturas da placa de teste, pela presença das placas sensoras.

Nos ensaios realizados, os valores da deformação medidos pelos extensómetros eléctricos nas diferentes posições são apresentados na tabela 7.2. Na mesma tabela podemos também ver os valores calculados pelo modelo de análise de elementos finitos. Salienta-se que os valores obtidos pelo modelo numérico não são valores médios, mas sim valores dos nós nessas posições. Pode-se assim verificar que os valores apresentados estão na mesma gama, confirmando assim a metodologia usada, quer pelo modelo de elementos finitos assim como as suposições anteriormente efectuadas sobre os valores das deformações. Nos cálculos efectuados verifica-se também uma divergência para as posições I e G, em que os valores do modelo são significativamente maiores do que os medidos experimentalmente.

Tabela 7.2 – Valores da deformação medidos e calculados.

| Localização dos sensores | Extensómetros<br>[ $\mu\epsilon$ ] | Modelo de elementos finitos<br>[ $\mu\epsilon$ ] |
|--------------------------|------------------------------------|--|
| D                        | 447,6                              | 492,5  |
| E                        | -63,8                              | -69,6  |
| F                        | 370,8                              | 393  |
| I                        | 495                                | 550  |
| G                        | 458,9                              | 488,8  |
| H                        | 275,5                              | 380  |
| CFRP                     | 273 (FBG)                          | 381  |

Esta diferença é observada ao longo de todo o ensaio de tracção realizado. Quando se comparam os valores das deformações obtidos nas posições F, H e I, figura 7.51, observam-se as mesmas tendências tanto para os valores experimentais como para os resultantes dos cálculos numéricos. Ainda existe alguma diferença nos valores, mas esta pode dever-se a algumas variações nas condições fronteira, assim como ao desconhecimento do comportamento do entrelaçado do reforço em fibra de vidro usado.

Na figura 7.51, pode-se observar as deformações impostas à placa ensaiada, e também à placa sensora em fibra de carbono/epóxico, na posição H. Mostrando que apesar das posições relativas de sensor F e H, eles de facto “sentem” valores diferentes ao longo do ensaio. Tal parece demonstrar que pelo facto de não existir placa sensora colada naquele ponto, F, os valores em deformação são maiores, permitindo observar a influência da placa sensora em fibra de carbono/epóxico no comportamento mecânico da estrutura em ensaio de fibra de vidro/epóxico. Podemos sublinhar o reforço imposto pela placa sensora, mais fácil de visualizar uma vez realizada uma ligeira amplificação dos resultados, e observar a ligeira flexão da placa de ensaio, figura 7.48.

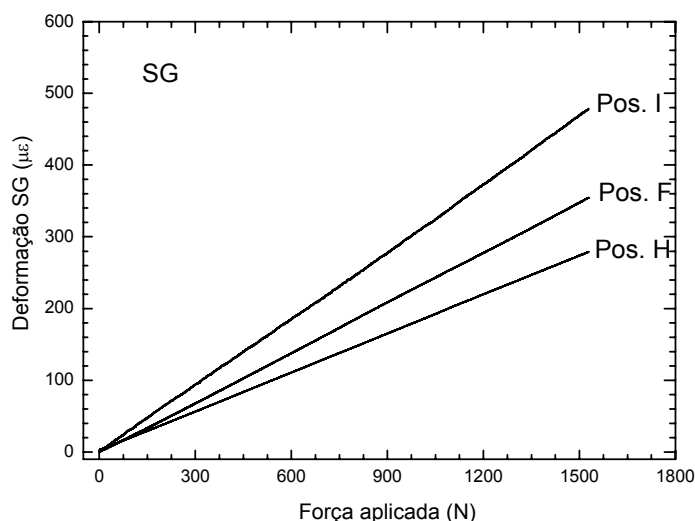


Figura 7.51 – Valores obtidos pelos sensores eléctricos.

Os cálculos resultantes da análise por elementos finitos evidenciam resultados semelhantes aos obtidos experimentalmente, figura 7.52, embora com valores absolutos



superiores para todos os sensores, sendo que as diferenças são perfeitamente aceitáveis, havendo uma boa aproximação destes aos valores obtidos pelos extensómetros. No entanto, estes estão influenciados pelo desconhecimento do comportamento exacto do entrelaçado de tecido usado, refira-se “twill” 2/2, o qual só permite em termos numéricos fazer uma aproximação aos valores dos módulos e não tanto à forma do entrelaçado que, pensa-se, influenciará o seu comportamento, pelo menos localmente.

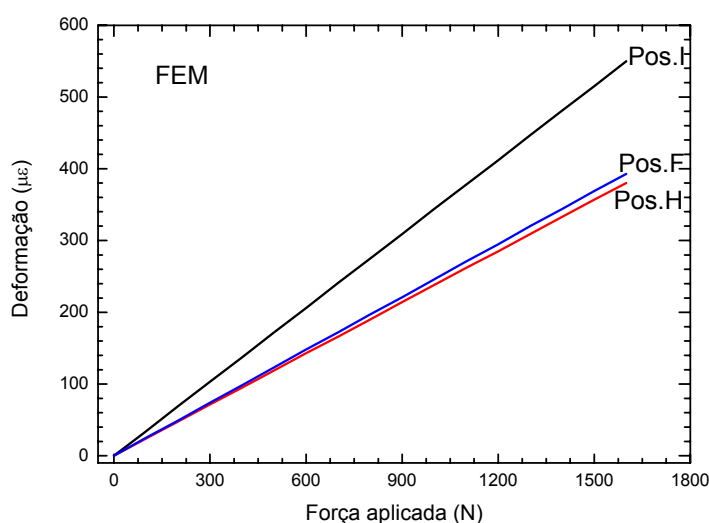


Figura 7.52 – Valores calculados por elementos finitos.

Observa-se que a placa sensora sofre uma deformação inferior à obtida pela placa de teste, muito possivelmente devido à sua maior rigidez. O facto do material adesivo usado para a colagem ter um valor de rigidez muito baixo, também permite que tal aconteça. Inclusivamente este último pode mesmo funcionar como filtro, podendo não transmitir na totalidade todas as pequenas deformações que ocorram na superfície da placa de ensaios à placa sensora. Observa-se, no entanto, que a deformação registada na superfície da placa de teste é praticamente igual à deformação obtida no meio da placa sensora, precisamente onde se encontra a rede de Bragg. Facto que foi verificado pelos ensaios experimentais.

Na figura 7.53, apresentam-se os valores da deformação calculados pela análise em elementos finitos, para a placa de ensaio sem a placa sensora colada, em função dos

valores obtidos pelo sensor óptico embebido na placa sensora, a partir da qual é possível estabelecer uma calibração para a placa sensora em função do tipo de estrutura ensaiada. Tal calibração do sensor é necessária sempre que se alteram as condições de aplicação.

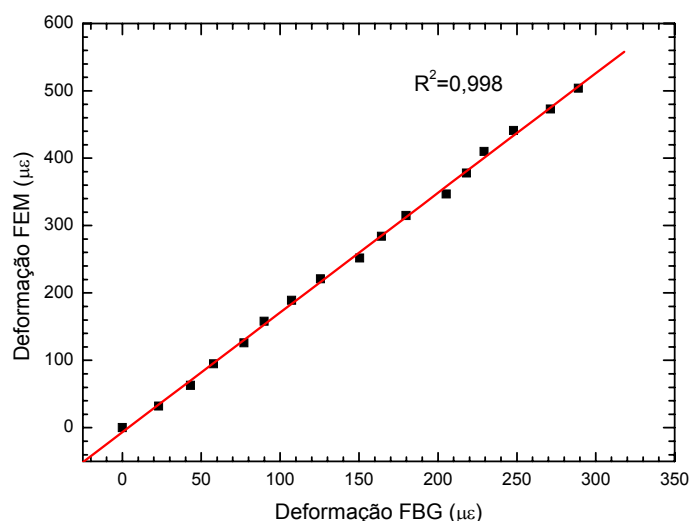


Figura 7.53 – Correlação entre os valores calculados e obtidos pelo sensor óptico, na posição H.

#### 7.5.4 – Discussão dos resultados

Pode-se observar que a placa sensora em fibra de carbono/epóxico sofre uma deformação inferior à da estrutura em análise em fibra de vidro/epóxico, o que para isso muito deve contribuir o facto da placa de carbono/epóxico possuir uma maior rigidez, muito embora se tenha usado uma espessura fina de material adesivo, quando se fez a sua colagem. Este último, é convicção que possa muito bem funcionar como filtro não transmitindo todas as deformações ocorridas na superfície da placa de ensaios à placa sensora.

No entanto, é de enaltecer a boa resposta obtida pela placa sensora, podendo o campo das deformações ser obtido após a realização da calibração do sensor. Sendo que o efeito de reforço localizado por parte da placa sensora poderá também ele ser otimizado alterando as dimensões da placa, por exemplo, entre outras medidas.

## 7.6 – Caracterização da placa sensora em ensaios dinâmicos

### 7.6.1 – Introdução

Os ensaios foram realizados com o auxílio de uma máquina de ensaios que permite realizar flexão em três ou quatro pontos de apoio. A distância entre apoios pode ser alterada, em função das dimensões das placas. No entanto, existem algumas limitações, nomeadamente, o facto de não ser aplicável a placas pequenas, dada a distância mínima necessária entre apoios.

Os provetes ensaiados foram carregados segundo um ensaio de flexão em quatro pontos, sob solicitação dinâmica, com uma carga,  $F$ , aplicada nos dois pontos superiores a uma frequência de 10 Hz. Dada a configuração e montagem do dispositivo, este não permite realizar ensaios com frequências diferentes. O deslocamento máximo imposto no centro do comprimento do provete em relação à linha horizontal variou em função da placa ensaiada ou da estrutura. As placas laminadas têm uma flecha maior, comparativamente com uma estrutura sanduíche ensaiada, na qual foram aplicadas pequenas amplitudes e obtiveram-se deformações significativas. Nesta última estrutura, se fosse aplicada uma amplitude da ordem da aplicada às placas laminadas, provocaria a sua completa destruição. A colocação dos provetes na máquina de ensaios e a respectiva orientação das forças aplicadas está representada na figura 7.54.

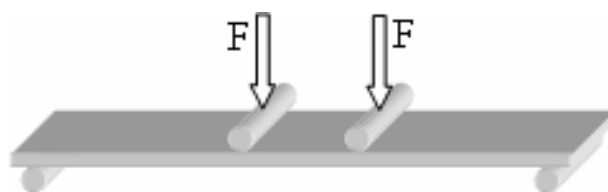


Figura 7.54 – Esquema da carga aplicada na flexão de quatro pontos.

Os provetes foram ensaiados segundo o esquema da figura anterior e para tal utilizou-se a máquina de ensaios que se apresenta na figura 7.55. Este equipamento permite realizar ensaios de flexão dinâmica com um deslocamento imposto pelo

operador. No caso dos ensaios realizados para este trabalho, esse deslocamento foi verificado com o auxílio de um comparador, colocado de forma a ler o máximo de amplitude atingido pelo provete, no início de cada realização experimental.

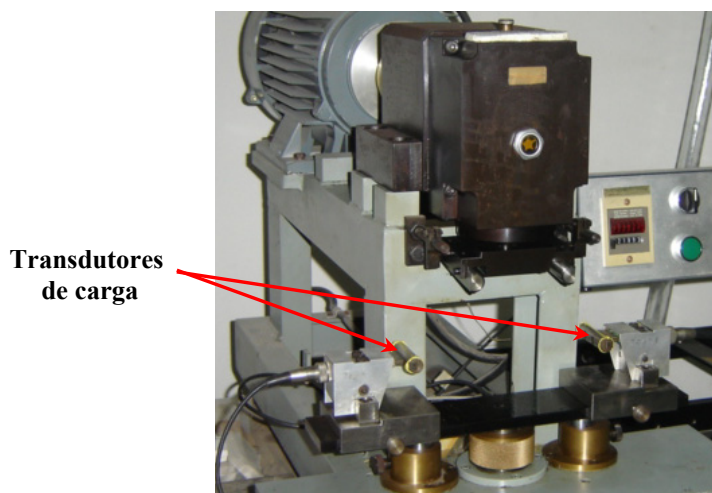


Figura 7.55 – Máquina de ensaios utilizada na flexão em quatro pontos.

O sistema possui dois transdutores de carga situados nos pontos de apoio, sendo a distância entre eles regulável. Os transdutores, individualmente, são constituídos por uma lâmina que se encontra solidária com uma ponte de Wheatstone. Estes encontram-se calibrados (folha de calibração em anexo). No entanto, na fase inicial do trabalho realizou-se a verificação dos valores anteriormente obtidos, pelo que os transdutores mostraram funcionar correctamente.

No gráfico da figura 7.56 está representada uma das curvas de calibração realizadas para um transdutor de carga. Para essa calibração foi usada a máquina de ensaios, INSTRON<sup>®</sup>, com uma velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min, e para uma força máxima aplicada de 1100 N. A medição dos valores de tensão eléctrica obtidos foram realizados através do sistema de aquisição Spider8 da HBM<sup>®</sup>, na função de multímetro.

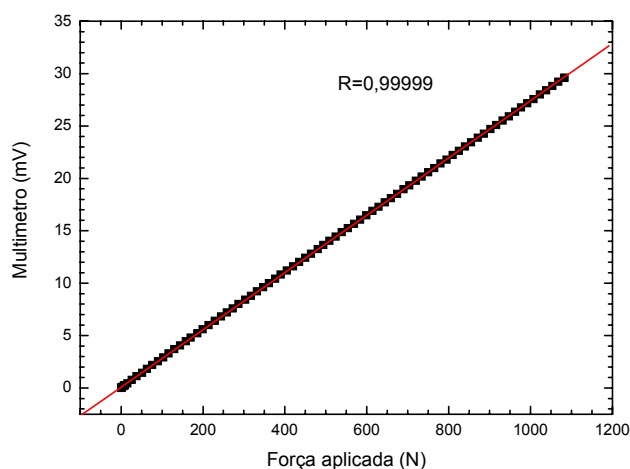


Figura 7.56 – Curva de calibração de um transdutor de carga.

### 7.6.2 – Placa sensora laminada em fibra de carbono/epóxico

As dimensões das placas para este tipo de ensaios teve de ser alterada em relação às anteriores, dado que a máquina de ensaios assim o exigiu. A placa tem as seguintes dimensões:  $220 \times 50 \times 0,4 \text{ mm}^3$ , sendo feita em tecido de carbono “twill” 2/2 por autoclave. Esta foi sujeita a uma solicitação dinâmica que impõe à placa uma deformação também alternada e, neste caso concreto, com uma frequência de 10 Hz. Na figura 7.57 mostra-se uma das placas realizadas para os ensaios de flexão.

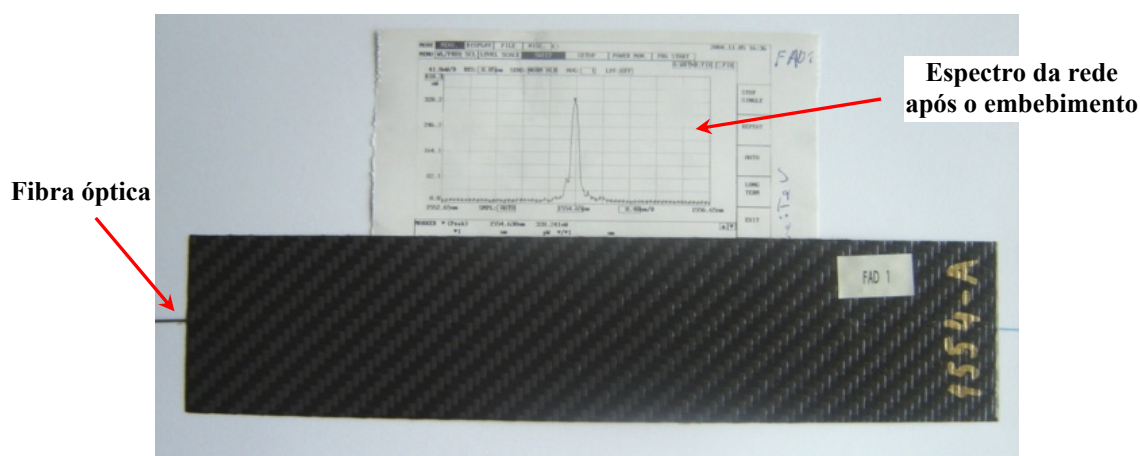
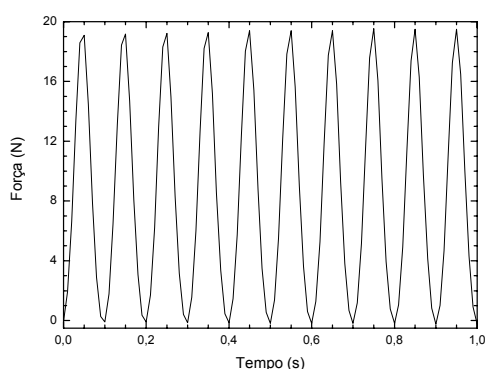


Figura 7.57 – Placa laminada em fibra de carbono/epóxico, usada nos ensaios de flexão.

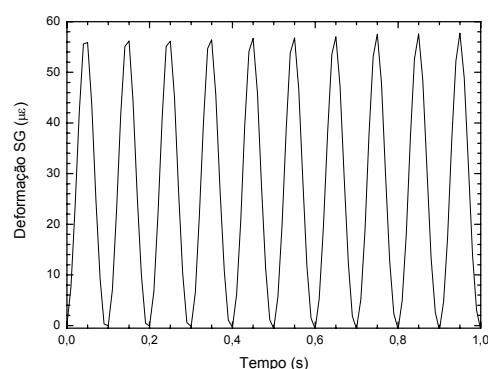
O set-up usado para estas observações realizadas no caso da fibra óptica foi o quarto set-up apresentado no capítulo 5, colocado a adquirir com uma taxa de 100 Hz. Eventualmente, neste tipo de ensaios, poder-se-ia usar uma taxa de aquisição superior. No entanto, o número de pontos seria de tal ordem, que formaria um volume de dados demasiado grande. Um pouco à semelhança do que viria a ocorrer com uma estrutura ensaiada e que se apresenta a seguir. Além disso, em termos de valores máximos e mínimos, não se notam grandes diferenças, ou melhoria significativa, pelo facto da taxa ser superior. Em ensaios de curta duração e com solicitações diferenciadas ou mesmo desconhecidas, fará todo o sentido aplicar uma taxa maior.

Para a aquisição dos valores da força registada pelos transdutores de carga e que serviam de pontos de apoio, foi usado o mesmo sistema de aquisição do extensómetro. Dado que este equipamento permite oito canais de entrada e todos com grandezas diferentes, ou pelo menos não correlacionadas. O sistema usado foi o Spider8, da HBM<sup>®</sup>, com uma taxa de aquisição de 100 Hz, para todos os canais.

Após a confirmação da resposta espectral da rede de Bragg estar de acordo com o esperado, figura 7.57, realizaram-se ensaios de flexão com a placa, aplicando uma força alternada, cujas características estão representadas na figura 7.58 (a), para os quais se obtiveram os valores da deformação da figura 7.58(b).



(a)



(b)

Figura 7.58 – (a) Forma da força alternada aplicada. (b) Deformação imposta à placa.

Dadas as dimensões da placa e pelo facto de ser muito fina e flexível, os valores registados pelos transdutores de carga são relativamente baixos. Isto obrigou a proceder a uma ligeira alteração na máquina de ensaios, mudando a amplitude de oscilação máxima para 4 mm, na zona de maior amplitude da placa sensora, valor do máximo de flexão da placa em relação à posição de ausência de força. Este valor foi estabelecido com o auxílio de um comparador, tendo uma resolução de 0,01 mm.

O comportamento da rede de Bragg embebida na placa pode ser observado no gráfico apresentado na figura 7.59. Observa-se que a deformação da rede acompanha o andamento da força alternada aplicada.

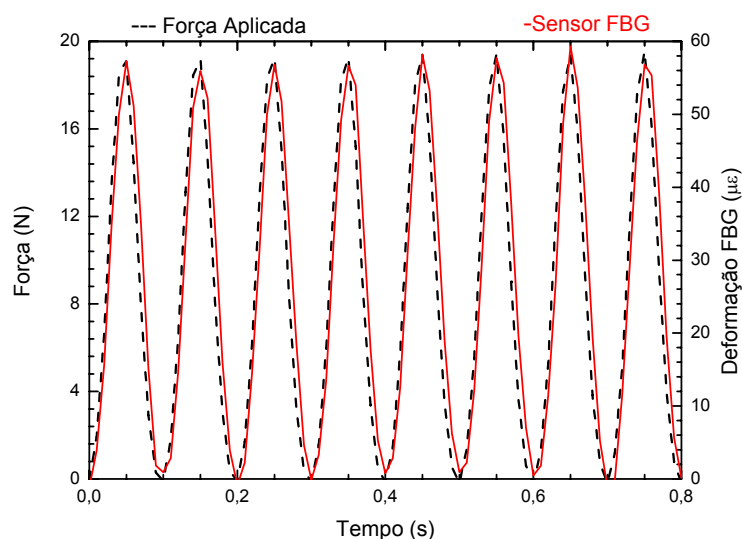


Figura 7.59 – Deformação medida pelo sensor óptico embebido.

Para a intensidade da força aplicada observa-se uma deformação também ela baixa. No entanto, o ponto principal deste tipo de ensaios foi verificar o comportamento da rede de Bragg embebida, em relação a uma força alternada aplicada, e poder verificar que os valores obtidos pelos dois tipos de sensores são semelhantes. Isso mesmo pode ser observado pelos dados expostos na figura 7.60, para um tempo de ensaio de 5 minutos.

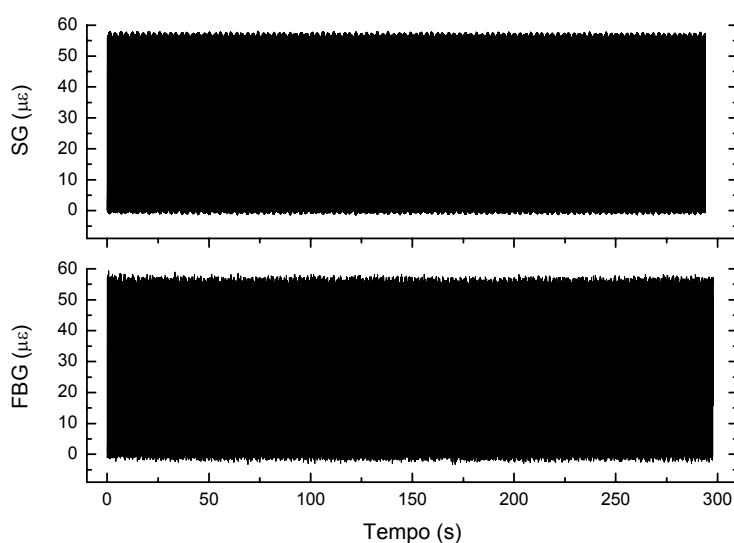


Figura 7.60 – Deformações medidas pelos sensores, mostrando a consistência nos valores alcançados ao longo do ensaio.

Esta figura mostra que ambos os sensores apresentam um comportamento sem alterações durante a realização do ensaio, mantendo sempre em termos médios os mesmos valores de deformação, apesar das flutuações próprias de cada sistema de monitorização. Na figura 7.61 mostra-se uma fracção desse ensaio, com as deformações registadas pelos dois sensores em comparação.

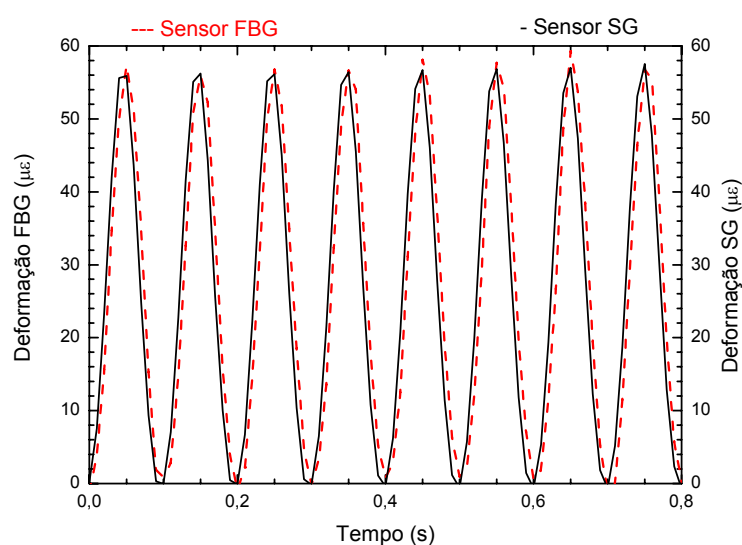


Figura 7.61 – Comparação entre a rede de Bragg e o extensómetro.



Fazendo uma observação mais pormenorizada, figura 7.61, com a junção no mesmo gráfico das deformações registadas pelos dois sistemas de monitorização, pode-se verificar que, em função da carga aplicada à placa compósita, a resposta dos sensores mostram uma grande concordância, tanto em forma como em valores máximos alcançados. Pelo facto da placa ser muito fina, leva a que os sensores estejam separados por apenas 200  $\mu\text{m}$ , ou menos ainda, apesar de essa ser a espessura mínima de uma camada de tecido “twill” 2/2, separação que contribuirá para essa aproximação de resultados.

Embora numa visão mais global do decorrer do ensaio, que neste caso foi de sensivelmente 5 minutos, figura 7.60, pode-se observar uma ligeira diferença entre os valores obtidos ao longo de todo o ensaio, muito possivelmente devido às flutuações que ocorrem mais frequentemente no sistema óptico. Se nos gráficos da figura 7.60, fossem calculadas as diferenças de deformação no início da experiência e no fim da mesma, verificava-se que essas diferenças são desprezáveis, podendo perfeitamente serem entendidas como pertencentes às margens de erro associadas com os equipamentos. Tal pode ser constatado pela observação realizada na figura em que se apresenta um maior detalhe, com um conjunto de pontos adquirido num intervalo de tempo inferior a um segundo, concretamente 0,8 segundos.

### **7.6.3 – Provete em estrutura sanduíche obtida por RTM**

A estrutura aqui ensaiada, apresentada na figura 6.19, foi solicitada durante uma hora e vinte e quatro minutos, sensivelmente. Macroscopicamente, não foi verificado qualquer anomalia ou mesmo sintoma de degradação da mesma. Devido à maior espessura deste provete, figura 7.62, foi necessário alterar a amplitude de oscilação do equipamento. Foi reduzido para um milímetro de oscilação máxima, dado que, caso contrário, os esforços envolvidos na máquina de ensaios seriam de tal ordem, que efectivamente nada de positivo traziam à situação que se pretendia em concreto analisar, ou seja, verificar se o sensor óptico estava a ler conforme se esperava, e verificar se estes detectavam qualquer degradação na estrutura.

Procedimento semelhante foi tido com esta estrutura, colando um extensómetro eléctrico à superfície da placa ao nível do sensor de Bragg. Os resultados obtidos pelos diferentes sensores, sejam o extensómetro eléctrico, e o sensor em rede de Bragg, assim como os transdutores da carga, não denotaram qualquer diminuição das suas intensidades máximas atingidas logo após o primeiro ciclo, sendo possível verificar que o comportamento da amostra não sofreu qualquer alteração durante a realização do ensaio. Nos resultados apresentados, apenas é considerada uma pequeníssima parte da amostragem.

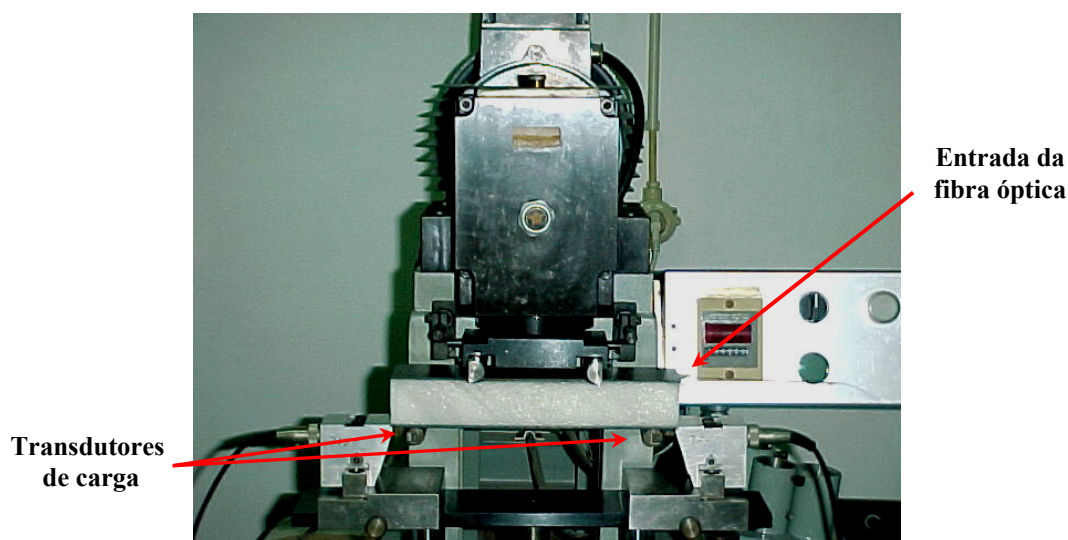


Figura 7.62 – Exemplo de um provete sanduíche montado na máquina de ensaios.

Na figura 7.63, pode-se verificar a carga aplicada à placa compósita, de forma alternada, assim como a deformação imposta e medida pelo extensómetro eléctrico. Estes resultados mostram uma grande concordância entre a forma da força e a deformação sofrida pela estrutura. E essa concordância é estendida aos sensores envolvidos na monitorização conjunta, como se poderá observar pelas respostas obtidas pelos diferentes sensores, e cujos resultados são expressos nos gráficos que se apresentam.

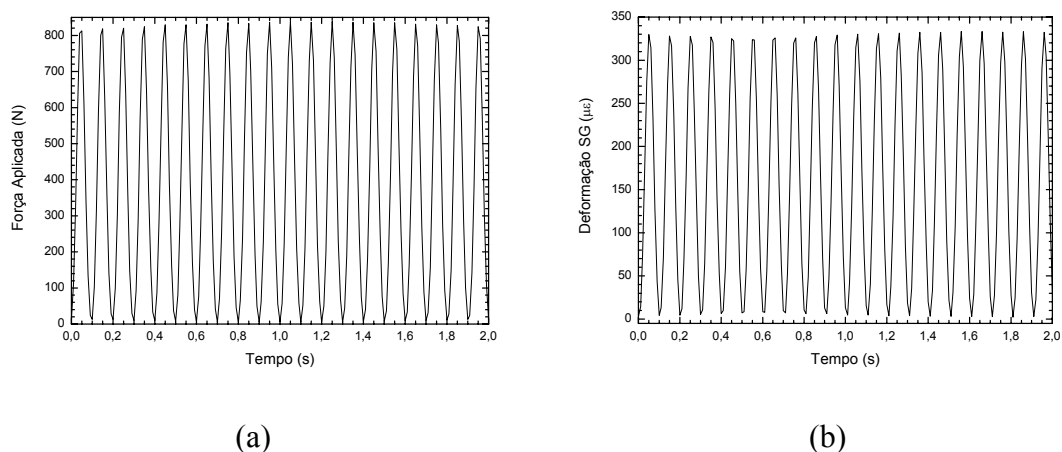


Figura 7.63 – (a) Força alternada aplicada (b) Deformação imposta à estrutura sanduíche.

De uma forma mais pormenorizada pode-se observar o comportamento da força em função do tempo, e a respectiva deformação sofrida pela estrutura, ambos representados no mesmo gráfico, evidenciando uma boa concordância de comportamentos. Como se pode constatar, os valores envolvidos na força aplicada são realmente elevados, comparativamente com a placa laminada.

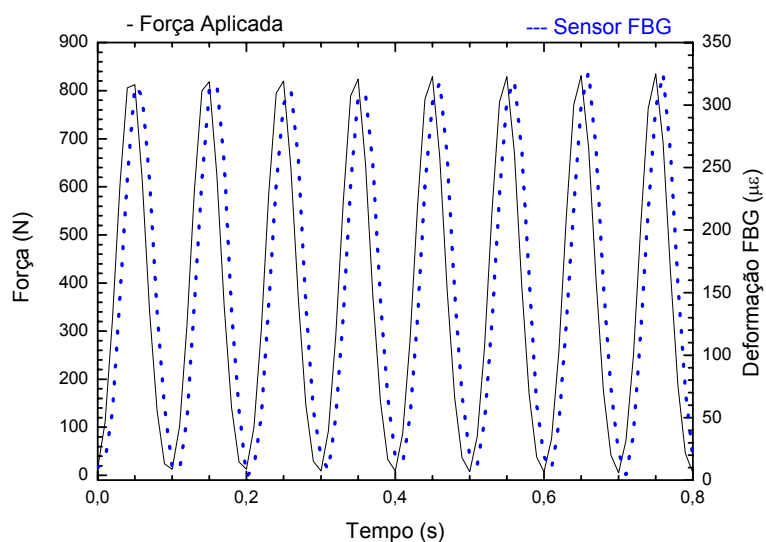


Figura 7.64 – Comportamento do sensor óptico em função da força aplicada.

A resposta do sensor de rede de Bragg em fibra óptica embebida numa das peles, foi comparada com a resposta do extensómetro eléctrico, colado à superfície. Os sensores exibem similares tendências, a deformação máxima obtida pelos dois sensores é sensivelmente a mesma, figura 7.64.

Este tipo de comportamento permite evidenciar também o facto de após a aplicação de um conjunto relativamente alargado de ciclos a uma estrutura com este porte, ela permanece inalterável, não denotando qualquer deformação residual, figura 7.65, numa reduzida parte deste ensaio. Os sensores apresentam, sensivelmente, os mesmos valores ao longo do ensaio que no caso decorreu durante mais de uma hora.

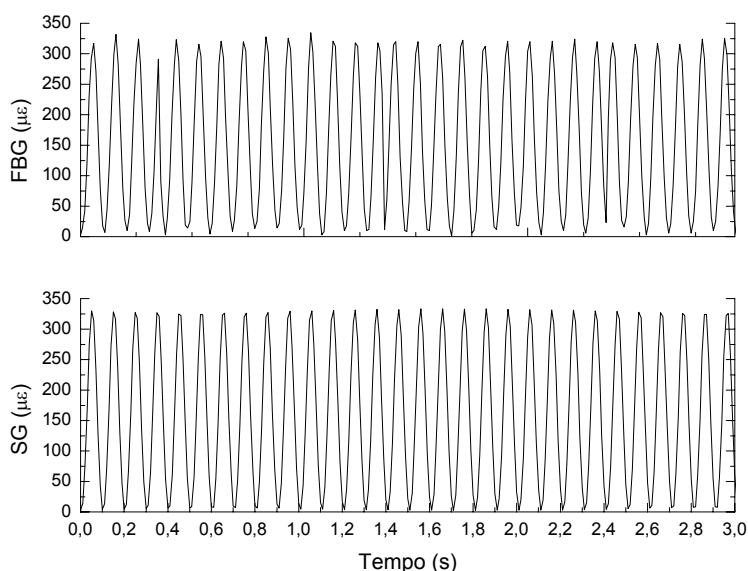


Figura 7.65 – Excerto representativo de uma parte ínfima do comportamento dos sensores na estrutura, para um intervalo de tempo de 3 segundos.

Dos resultados obtidos foi possível verificar que apesar de ter havido alguma alteração nos sensores óptico e eléctrico, mas com igual comportamento, isto deveu-se a uma pequena dificuldade técnica na fixação da estrutura à máquina de ensaios. No entanto, observou-se que as diferenças entre as amplitudes de oscilação no início do ensaio e no fim do ensaio, foram de sensivelmente de 0,04 nm, em termos de variação de comprimento de onda da rede de Bragg, o que equivale a dizer que houve uma diferença de 33,33  $\mu\epsilon$  de deformação. Potencialmente, o valor poderia ser significativo,

se não fosse a hora e vinte e quatro minutos de ensaio consecutivo a uma estrutura desta espessura e com algumas tentativas de correcção dos seus escorregamento durante a realização do mesmo, como são perfeitamente perceptíveis na amostragem global dos valores obtidos que, refira-se, foram realizados a uma taxa de 500 Hz. Obviamente que o armazenamento e tratamento dos resultados está seriamente limitada, quando feitos em conjunto.

O número excessivo de pares de valores adquiridos, mais uma vez vem reforçar que para este tipo de ensaios de longa duração não há uma verdadeira necessidade de obter valores a uma taxa de aquisição elevada, uma vez que os resultados obtidos serão obviamente semelhantes, salvo se ocorrerem anomalias durante o ensaio.

A figura 7.66 mostra o andamento das deformações registadas quer pelo sistema eléctrico quer pelo sistema óptico, do qual se pode constatar uma boa concordância no comportamento em função da carga aplicada.

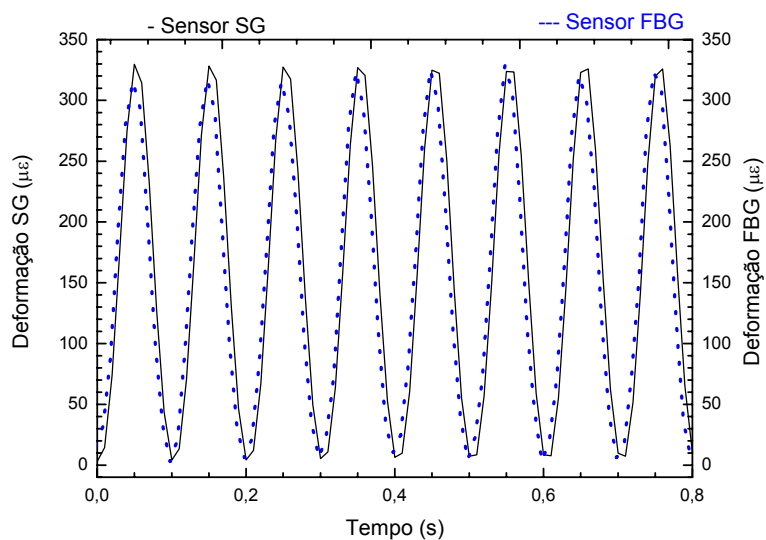


Figura 7.66 – Resposta do sensor óptico (FBG), e do extensómetro eléctrico (SG).

#### 7.6.4 – Discussão

Neste provete os resultados da deformação da estrutura sanduíche obtidos pelos sensores, óptico e eléctrico, são equivalentes temporalmente. Verificou-se que a deformação oscila entre 0 e 325  $\mu\epsilon$ , aproximadamente. Foi possível observar através dos valores da deformação registados pelos dois sistemas, que durante o tempo do ensaio, não foi verificada qualquer degradação do material constituinte da estrutura, quer do material do núcleo, nem tão pouco das peles. No final do ensaio foi ainda realizada uma observação visual à estrutura e não foi detectada qualquer degradação ou dano. Embora neste caso as solicitações impostas não foram suficientemente destrutivas para se manifestarem.

Estes sensores demonstram ser bons candidatos para a concepção de um sistema “nervoso” para materiais compósitos inteligentes, ao permitirem a monitorização em contínuo da integridade do material anfitrião, principalmente pela possibilidade de serem embebidos na estrutura. Os sensores em rede de Bragg denotam de facto ser mais apropriados para medições de deformação dinâmica em baixas frequências. Com a vantagem de poder ser multiplexado, é possível obter numa estrutura real vários sensores que possam ser distribuídos ao longo da estrutura, e ter como meio de comunicação entre a estrutura e o sistema de monitorização uma única fibra óptica.

### 7.7 – Conclusão

As placas sensoras laminadas realizadas com apenas 400  $\mu\text{m}$  de espessura, na mais espessa, tiveram um comportamento muito bom às solicitações a que foram sujeitas, com ciclos sucessivos de carga aplicada, e obtiveram-se linhas comportamentais sempre coincidentes, em todos os testes realizados e para cada uma das placas consideradas.

Em função dos resultados obtidos por essas placas e em virtude das características da fibra de carbono, foi então considerada como placa de ensaio genérica a placa

sensora em fibra de carbono/epóxico. Para esta estrutura foram, então, realizados alguns cálculos numéricos no sentido de saber, qual a real necessidade de utilizar fibra óptica com revestimento na zona do sensor, verificando-se que a zona de transferência de carga é suficientemente pequena quer numa, quer na outra, de forma que, embora a fibra óptica sem revestimento seja mais sensível, ela é também mais frágil. Assim, dependendo das aplicações e das condições de embebimento, poder-se-á optar sem qualquer prejuízo das grandezas a determinar, por realizar embebimentos de fibras sem revestimento na zona da rede de Bragg.

Nas placas sensoras de dimensões diferentes, mas com a mesma estrutura de construção, obtiveram-se valores bastante interessante em diversos ensaios realizados demonstrando que comportamentalmente as placas sensoras poderão tornar-se um óptimo elemento sensor em material compósito, substituindo cabalmente os extensómetros e, principalmente, poderem fazer parte de estruturas maiores, das quais possam dar indicações, pela monitorização da sua integridade, por exemplo. Pode mesmo, depois de melhorados alguns aspectos, serem elaborados alguns sensores, para serem utilizados em monitorizações mais difíceis, ou por razões de acessibilidade ou por razões de isolamento eléctrico, além da possibilidade de multiplexagem, e utilizar mais do que um tipo de sensor. É também observado que as placas sensoras, quando utilizadas indiscriminadamente nas mais diversas aplicações para medições de deformações ou outras, podem ter resultados inversos, isto é, não estarem a funcionar como elemento sensor de uma estrutura, mas sim serem mais um elemento de reforço localizado na zona de aplicação.

Verificou-se, também, que estas placas sensoras compósitas laminadas apresentam um bom comportamento a solicitações dinâmicas de baixa frequência.

É de importância vital, para o sistema considerado que as redes de Bragg, a serem utilizadas nas aplicações, sejam escolhidas com algum cuidado, principalmente, havendo a possibilidade de saber qual o possível valor máximo a atingir pela placa sensora, ou então que sejam, desde a produção, pensadas no sentido de poderem serem submetidas a elongações que possam ultrapassar o valor médio de trabalho do filtro óptico, de 2 nm.





# Capítulo 8

## 8 – Concepção de outras placas com sensores ópticos embebidos

### 8.1 – Introdução

As fibras ópticas podem ser muito úteis em aplicações com materiais compósitos laminados, como é o caso dos sensores com modulação de luz em intensidade. Na primeira parte deste capítulo, é apresentada uma nova configuração de um sensor de pressão e temperatura, baseado em pré-impregnados de fibra de carbono/epóxico e fibra de vidro/epóxico, e com fibras ópticas embebidas entre as diferentes camadas do material compósito.

Na segunda parte do capítulo, apresenta-se a elaboração de uma roseta em rede de Bragg de fibra óptica, embebida em material compósito, concretamente entre duas camadas de “twill” 2/2, pretendendo ser uma alternativa às rosetas clássicas eléctricas. Produziu-se e testou-se uma roseta rectangular, assim como uma roseta com configuração de base delta, em redes de Bragg, para determinação das tensões e deformações em materiais compósitos, comparando os resultados obtidos com as rosetas feitas por extensómetros eléctricos.

Ao embeber os sensores de fibra óptica em materiais compósitos, é possível melhorar o processo de fabrico, dada a possibilidade de monitorização de parâmetros como a temperatura, a pressão, a deformação, o grau de cura, a viscosidade e a composição química [16]. Os sensores podem, também, ser aplicados na avaliação da integridade de uma estrutura em serviço, tal como se apresenta na terceira parte do capítulo, em que se concebeu uma placa laminada com o embebimento de dois tipos de sensores ópticos, uma rede de Bragg e uma cavidade interferométrica de Fabry-Pérot. Le Blanc *et al.*[19] e Zhou *et al.*[20] utilizaram, com sucesso, sensores em fibra óptica na avaliação de dano em materiais compósitos.

## **8.2 – Sensor simultâneo de pressão e temperatura numa placa compósita híbrida**

Boming Zhang *et al.* [245] propuseram soluções usando fibras ópticas multimodo capazes de monitorizar a viscosidade da resina durante o processo de produção de compósitos. Hiroaki Tsutsui *et al.* [246] apresentaram um sistema capaz de detectar dano por impacto em painéis finos de material compósito, com base em fibras ópticas de pequeno diâmetro embebidas. Yang Zhao *et al.* [247] propuseram um sistema distribuído, em fibra óptica, para realizar medidas de deformação nas zonas de interface entre a fibra de carbono colada ao betão, usado nas estruturas de engenharia civil.

Nobuhira Tanaka *et al.* [248] propuseram um compósito híbrido em que havia compensação de temperatura, para a medição de deformações, usando redes de Bragg embebidas em compósitos laminados. Nesta situação, o híbrido consistia em fibra de carbono e em fibra de vidro, colocados em série.

As medições de pressão, ou seja, as cargas transversas à fibra óptica, foram efectuadas por sensores de microcurvatura. Estas técnicas usam o decréscimo da transmissão de luz na fibra óptica devido a perturbações mecânicas [249].

### 8.2.1 – Concepção da placa sensora

A realização desta nova cabeça sensora consistiu na concepção de um compósito laminado híbrido. Na tabela 8.1, apresentam-se algumas das propriedades dos materiais compósitos pré-impregnados que foram utilizados para a produção desta placa.

Tabela 8.1 – Algumas das propriedades dos pré-impregnados utilizados.

|  | Fibra de carbono | Fibra de vidro |
|--|------------------|----------------|
|  | <i>Twill2/2</i>  | <i>Tafetá</i>  |
| <i>Modulo de Young (GPa)</i>   | 54               | 25             |
| <i>Resistência à Tracção (MPa)</i>                                     | 760              | 415            |
| <i>ILSS (MPa)</i>  | 69               | 59             |
| <i>Coefficiente de Poisson</i>   | 0,3              | 0,18           |
| <i>CET (<math>\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}</math>)</i> | - 0,6            | 5              |

ILSS – Resistência à Tensão Interlaminar

CET – Coeficiente de Expansão Térmica

A placa sensora, que agora se apresenta, teve uma elaboração ligeiramente diferente das anteriores. A placa consiste no empilhamento dos materiais compósitos de forma a que uma fibra óptica é colocada entre as duas camadas de fibra de carbono/epóxico, uma outra é colocada entre as camadas de fibra de vidro/epóxico e, por fim, a terceira fibra óptica é colocada entre os dois materiais diferentes, sendo que as fibras ópticas foram colocadas ao longo da direcção de 220 mm. Uma quarta fibra óptica é usada como elemento de referência. A figura 8.1 mostra o esquema do empilhamento usado, assim como o set-up implementado para a observação do comportamento da placa sensora.

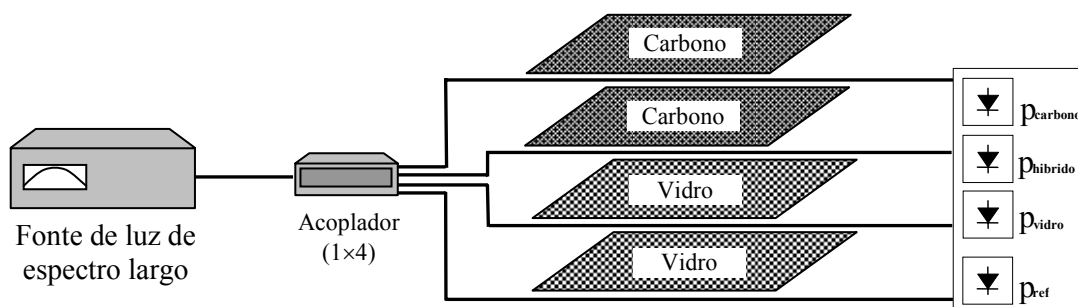


Figura 8.1 – Montagem experimental para a monitorização da placa.

As dimensões das placas compósitas são as seguintes:  $220 \times 50 \times 0,7 \text{ mm}^3$ . Não foram estabelecidas por nenhum critério em particular, apenas tiveram como preocupação a boa adaptação da placa à máquina de pressão usada para a realização dos testes mecânicos. As placas sensoras foram produzidas por prensa de pratos quentes.

### 8.2.2 - Caracterização da placa sensora

O sistema óptico usado na monitorização da placa compósita laminada híbrida, para a discriminação da pressão e da temperatura, é apresentado esquematicamente na figura 8.1. O sistema inclui uma fonte óptica de banda larga, para a iluminação das fibras ópticas, um acoplador (1×4), e também quatro fotodíodos para a monitorização da transmissão da potencia óptica. A fibra óptica usada nesta implementação experimental foi uma fibra óptica monomodo da Corning®.

A caracterização da placa compósita foi realizada com fibra óptica revestida, isto é, a fibra óptica foi colocada intacta dentro da placa compósita. A escolha deste tipo de fibra óptica deveu-se à possibilidade futura de usar outros componentes ópticos, que são baseados neste tipo de fibra monomodo. No entanto, na implementação realizada poder-se-ia ter usado outro tipo de fibra óptica, nomeadamente a fibra multimodo, podendo, eventualmente, tirar partido desse facto pelo ganho em sensibilidade, quando comparada com a fibra usada. No entanto, em termos de multiplexagem e de perdas com as conexões, é mais fácil trabalhar com a fibra usada.

Para a caracterização da placa sensora, definiu-se  $R$ , como potência óptica normalizada transmitida em que  $R_i = p_{ref} - p_i$ , com  $i = \text{carbono, vidro e híbrido}$ . A potência óptica transmitida por cada uma das fibras é dada por  $p_{carbono}$ ,  $p_{vidro}$  e  $p_{híbrido}$ , sendo normalizada em relação à potência obtida da fonte,  $p_{ref}$ , para eliminar eventuais flutuações da fonte óptica usada. Observou-se que a potência óptica normalizada correspondente à fibra óptica embebida entre as camadas de fibra de carbono,  $R_{carbono}$ , mostrou-se insensível às variações de temperatura e pressão aplicadas à placa sensora, no intervalo dos valores aplicados.

Para a realização dos ensaios em temperatura controlada, utilizou-se a estufa apresentada na figura 8.2(a). Enquanto que os ensaios em pressão, foram realizados, no equipamento apresentado na figura 8.2(b).

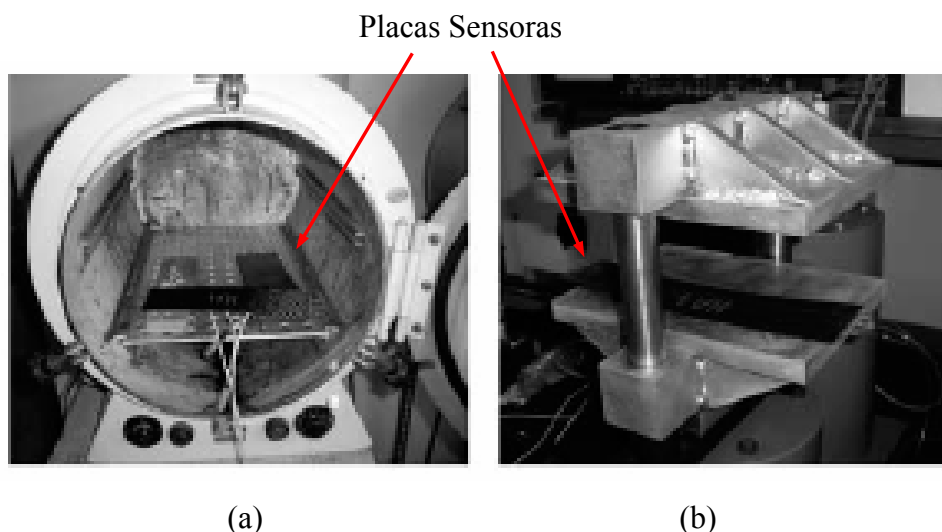


Figura 8.2 – (a) Estufa com temperatura controlada. (b) Máquina de pressão usada na realização dos testes.

Na figura 8.3 são apresentadas as observações obtidas no microscópio óptico da placa sensora laminada, no qual se efectuaram cortes de forma a evidenciar o bom empilhamento conseguido, inclusivamente, na figura 8.3 (b) é possível verificar numa imagem ampliada da zona de interface entre os dois materiais usados, a boa acomodação entre os dois materiais, A figura mostra também a boa interface na junção dos diferentes materiais, quer sejam nas zonas longitudinais, ou transversais da placa sensora.

A sua diferenciação é perfeitamente perceptível, não só pela diferente coloração que apresentam mas, principalmente, pelos diferentes diâmetros que se verificam nos dois tipos de fibras de reforço, sendo que a fibra de vidro tem um diâmetro superior à fibra de carbono.

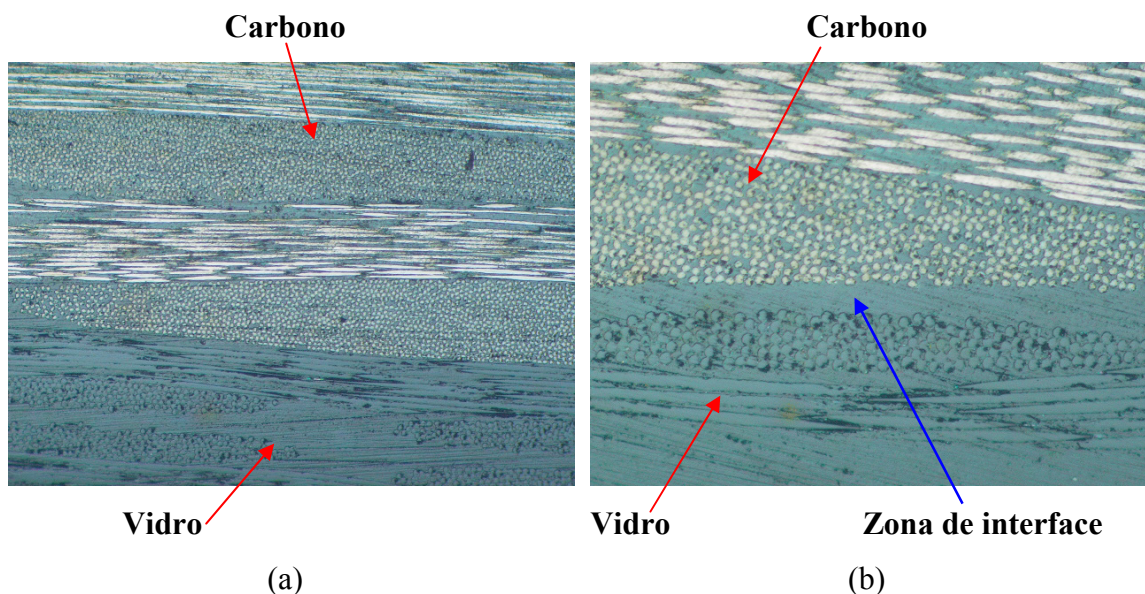


Figura 8.3 – (a) Corte longitudinal da placa. (b) Corte transversal ampliado, mostrando a região de interface do compósito híbrido.

Nestas placas sensoras, dado que as fibras ópticas não possuem qualquer gravação (i.e. rede de Bragg), o seu embebedimento não é muito problemático. Ou seja, os cuidados a ter com a fibra óptica, nomeadamente a sua colocação entre as camadas de material compósito, não são tão preocupantes. Na tabela 8.2, pode-se verificar em termos qualitativos, as perdas registadas com a inserção da fibra óptica no material compósito, em função das diferentes junções de materiais. Verificou-se que as maiores perdas na fibra óptica foram criadas durante o processo de arrefecimento do material compósito. Os elevados valores de perdas de inserção registados na zona híbrida é, muito possivelmente, devida aos diferentes diâmetros das fibras de carbono em relação às fibras de vidro, mas também aos diferentes coeficientes expansão térmica dos materiais compósitos.

Tabela 8.2 – Perdas verificadas na inserção, após o processo de cura.

| <i>Materiais</i>       | <i>Perdas de inserção<br/>(dB)</i> |
|------------------------|------------------------------------|
| <i>Carbono/Carbono</i> | 0.84                               |
| <i>Carbono/Vidro</i>   | 3.63                               |
| <i>Vidro/Vidro</i>     | 1.24                               |

### 8.2.3 - Semelhanças com o sensor de microcurvatura

A transmissão de luz em fibras ópticas, conforme foi referido anteriormente, assenta no fenómeno da reflexão interna total. Os propósitos associados a este fenómeno mantêm-se válidos desde que as curvaturas da fibra óptica sejam reduzidas, caso contrário o ângulo de incidência dos feixes luminosos na interface bainha/núcleo pode ser significativamente reduzido e, dessa forma, verificam-se perdas de sinal óptico.

Os sensores de microcurvatura têm como base os mecanismos descritos na figura 8.4, onde é apresentado, em esquema, um exemplo deste tipo de sensor. A fibra óptica é colocada entre duas superfícies que, ao aproximarem-se impõem à fibra pequenas curvaturas que podem ser significativas e, se assim for, haverá uma maior saída da luz do núcleo para a bainha. Desta forma, será possível estabelecer uma relação entre as perdas de sinal óptico e a pressão que é exercida entre as duas superfícies.

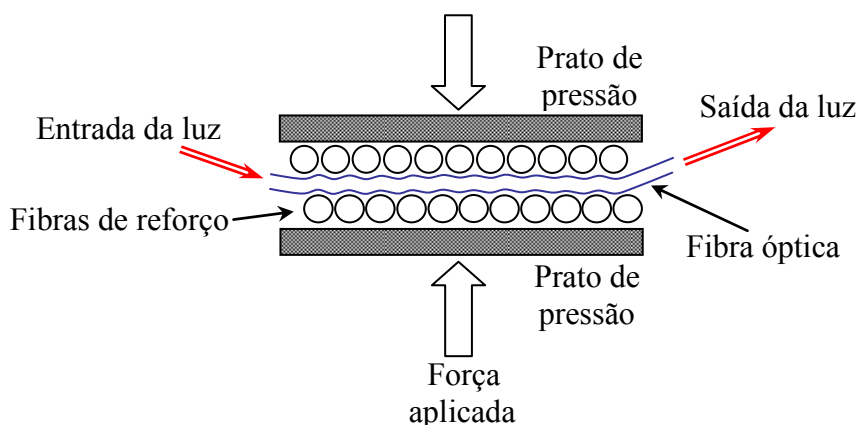


Figura 8.4 – Esquema geral de um sensor de microcurvatura

As perdas por microcurvatura têm representado um problema a contornar na aplicação das fibras ópticas em estruturas. No entanto, o fenómeno tem também sido aproveitado para a construção de sensores em fibra óptica que adaptaram este efeito para a medição de vários parâmetros físicos, tais como a temperatura e a pressão [35-37].

Com base no fenómeno descrito, e no facto das fibras de reforço que estão em contacto directo com a fibra óptica poderem ter diâmetros diferentes, assim como

coeficientes de expansão térmica também diferentes, o efeito de microcurvatura pode ocorrer não só pela aplicação de uma força nos pratos de pressão, figura 8.4, mas também pela alteração da temperatura.

#### 8.2.4 - Resultados obtidos com a placa sensora híbrida

Após o processo de cura, e após a abertura dos pratos da prensa, observou-se uma pequena curvatura na placa compósita híbrida, que resultou da junção dos dois diferentes tecidos, o de carbono e o de vidro. Definindo a curvatura ou encurvamento da placa, como  $1/R$ , em que o  $R$  é o raio da curvatura, na placa obtida foi, então, realizada uma medição à curvatura apresentada, cujo valor médio obtido foi de  $1,25 \text{ m}^{-1}$ . Por outro lado, eliminando a curvatura formada na placa compósita, não foi verificada qualquer alteração na potência óptica das fibras embebidas na placa. Foram realizadas medições semelhantes, para curvaturas ou encurvamentos da placa com uma amplitude de  $5 \text{ m}^{-1}$ , em ambas as direcções, o que mostrou insensibilidade à curvatura até esta amplitude, relativamente à potência óptica medida pelas fibras ópticas embebidas.

A análise da placa compósita consistiu na medição da temperatura, mantendo a pressão constante e igual a zero ( $P = 0$ ) e, de igual forma, as medições de pressão aplicadas foram realizadas com uma temperatura constante ( $T = 20^\circ\text{C}$ ). As figuras 8.5 e 8.6 mostram a evolução normalizada da potência óptica transmitida,  $\Delta R_i$ , quando a placa compósita está sujeita às variações de temperatura e pressão impostas, respectivamente.

A figura 8.5 mostra que, quando a placa é sujeita a um aumento de temperatura, verifica-se um aumento da potência óptica transmitida nas fibras ópticas embebidas. No entanto, na fibra óptica que se encontra rodeada por materiais diferentes, zona híbrida, observa-se uma maior variação do sinal óptico transmitido, quando comparado com as outras fibras ópticas. Este efeito surge devido ao diferencial de coeficientes de expansão térmica entre os dois materiais compósitos usados.



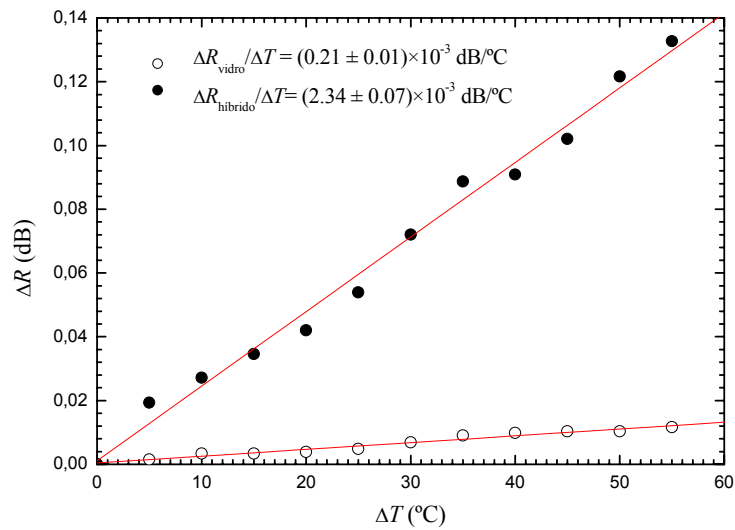


Figura 8.5 – Resposta da placa sensora à temperatura

Por outro lado, quando a placa compósita é sujeita a um aumento de pressão, a fibra óptica, embebida entre as camadas de fibra de vidro, apresenta uma maior variação de sinal, figura 8.6. Isto ocorre dada a menor espessura da camada de fibra de vidro, em comparação com a de carbono, e também devido ao diâmetro das fibras de vidro, quando comparadas com o menor diâmetro das fibras de carbono, o que induz maiores perdas de luz por microcurvatura.

Estes efeitos são semelhantes aos verificados no sensor de microcurvatura. Quer por expansão térmica ou por pressão, há um efeito de microcurvatura a alterar a potência de luz transmitida.

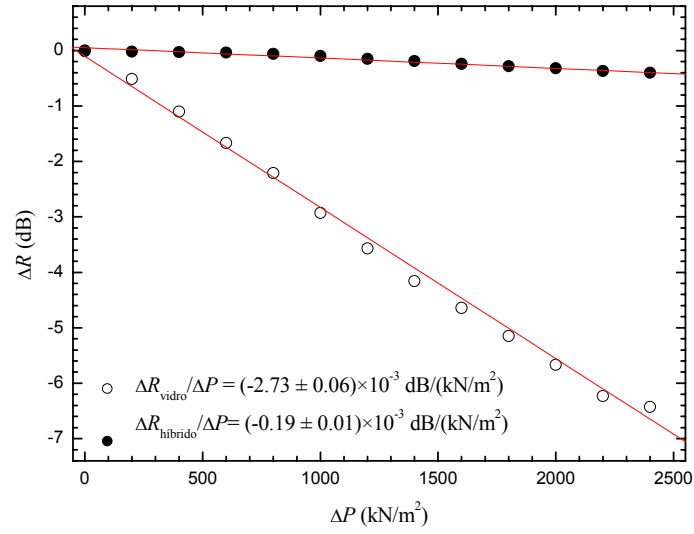


Figura 8.6 – Resposta da placa sensora à pressão.

Os resultados obtidos permitem escrever um sistema de equações, para  $\Delta T$  e  $\Delta P$ , na forma de uma matriz, tal que:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{P(hibrida)} & -K_{P(vidro)} \\ -K_{T(hibrida)} & K_{T(vidro)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_{vidro} \\ \Delta R_{hibrida} \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

onde  $D = K_{T(vidro)}K_{P(hibrida)} - K_{P(vidro)}K_{T(hibrida)}$  é o determinante da matriz, e  $K_j$  ( $j=T, P$ ) são os coeficientes das perdas de potência óptica transmitida da temperatura e da pressão, respectivamente.

As limitações da maioria dos métodos existentes para as medições simultâneas, surgem do facto de que, essas diferentes respostas não são substanciais, originando um valor pequeno para  $D$ , o que pode induzir erros significativos, além de uma baixa precisão.

Os coeficientes da matriz são obtidos a partir dos coeficientes dos declives dos valores experimentais, representados nas figuras 8.5, e 8.6. Dando origem à seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} = \frac{1}{6.34} \begin{bmatrix} -0,19 & 2,73 \\ -2,34 & 0,21 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_{vidro} \\ \Delta R_{hibrido} \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

com  $\Delta R_i$  em dB,  $\Delta T$  em °C e  $\Delta P$  em kN/m<sup>2</sup>.

O desempenho do sistema pode ser avaliado quando a cabeça sensora for simultaneamente sujeita a variações de pressão e temperatura, para gamas de operação na ordem dos 2500 kN/m<sup>2</sup> para a pressão e na ordem dos 60 °C, para a temperatura. Os resultados são mostrados na figura 8.7.

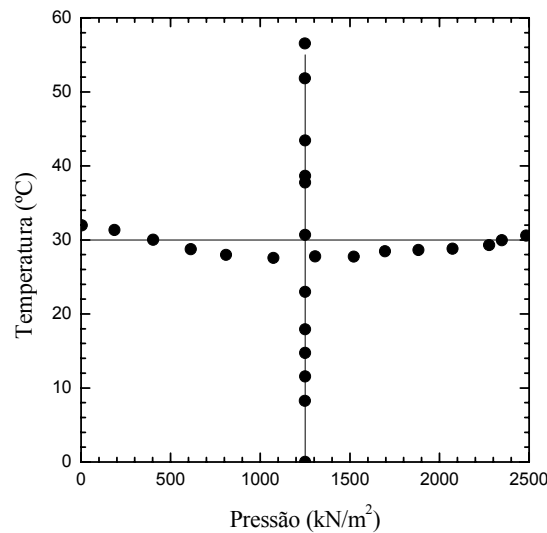


Figura 8.7 – Desempenho do sensor de acordo com a expressão 8.2, para as pressões e temperaturas aplicadas.

O desvio padrão (rms) é de  $\pm 0,6$  kN/m<sup>2</sup> e de  $\pm 2,5$  °C, para as medições de temperatura e pressão, respectivamente. Este tipo de configuração apresentou melhores resultados para a pressão, relativamente à temperatura. No entanto, a resposta obtida para os valores da temperatura apresenta um desvio aceitável. Estes desvios são devidos aos coeficientes de expansão térmica, para a região híbrida, e muito possivelmente devido ao declive não linear do  $\Delta R_{hibrido}$ .

### 8.2.5 - Conclusões

Foi desenvolvida uma nova placa compósita sensora híbrida, que mede simultaneamente a temperatura e a pressão, através de uma fibra óptica monomodo, embebida num compósito laminado. Este compósito inteligente pode operar na gama dos 2500 kN/m<sup>2</sup> para a pressão e até temperaturas de 60 °C. Para pressões superiores, é esperado que a fibra óptica embebida entre as camadas da fibra de carbono apresente alguma sensibilidade, até então não apresentada, podendo dessa forma vir a ser usada.

Relativamente às dimensões da placa compósita, duas perspectivas podem ser consideradas. Se actuar unicamente como ponto de medida, as dimensões devem ser negligenciadas quando comparada com a estrutura à qual pode ser unida. No entanto, se a estrutura necessitar de um reforço, as dimensões da placa compósita sensora terão que ser tidas em linha de conta.

A configuração obtida nesta placa sensora é particularmente apropriada para uma larga gama de aplicações em sensores de pressão, nomeadamente na indústria marítima, e mesmo aeroespacial, mas também na engenharia civil. Apresentando ainda a grande vantagem de ser fácil de manusear, e especialmente dirigida para aplicações de baixo custo. Acarretando as vantagens já referidas dos sensores em fibra óptica, como seja a imunidade electromagnética e de rádio-frequência assim como o isolamento eléctrico.

## 8.3 - Rosetas em fibra óptica

As redes de Bragg em fibra óptica têm-se tornado progressivamente no maior componente em desenvolvimento na tecnologia das fibras ópticas para utilização em materiais inteligentes. Tal é devido à possibilidade de se realizarem medidas em tempo real, de serem considerados um componente de baixo custo, além de possibilitarem a utilização de um grande número de sensores, com uma só ligação ao sistema de interrogação e aquisição, como resultado da possibilidade de multiplexagem. A medição de tensões e deformações com rosetas em fibra óptica foi já demonstrada com sensores interferométricos em fibra óptica [250], sensores ópticos de Fabry – Pérot [251] e, mais recentemente, com sensores de Bragg [252].

As rosetas baseadas em redes de Bragg têm várias vantagens sobre outros tipos de rosetas (ópticas ou eléctricas), porque são potencialmente mais fáceis e económicas de fabricar, para além de terem excelente capacidade de multiplexagem quando distribuídas ao longo de uma única fibra óptica. As rosetas, de acordo com a sua configuração, permitem determinar as deformações e tensões principais de um material através de duas ou três medições independentes de deformação. Estas estruturas são, desta forma, uma ferramenta muito importante na análise experimental de tensões em materiais e no desenvolvimento da tecnologia de estruturas inteligentes.

### 8.3.1 – Os princípios das rosetas

A exposição teórica aqui apresentada surge no contexto de rosetas de base eléctrica [253]. No entanto, é possível inferir que a mesma análise pode ser aplicada integralmente para o caso em que se utilizem rosetas com redes de Bragg em fibra óptica.

As rosetas são estruturas constituídas por três sensores, dispostos sobre um substrato, para medir as deformações principais ao longo de diferentes direcções. Os sensores nas rosetas estão tipicamente posicionados a 45° ou 120° entre si, formando

uma configuração *rectangular* ou *delta*, respectivamente. As várias configurações destes dois tipos de rosetas encontram-se ilustradas na figura 8.8. Estes sensores são usados quando se desconhecem as direcções das deformações principais e, podem ser instaladas no material sem qualquer orientação pré-definida. Em termos práticos, pouca diferença existe entre as rosetas rectangulares e as rosetas delta. A escolha entre estas duas configurações é baseada sobretudo em considerações de ordem prática.

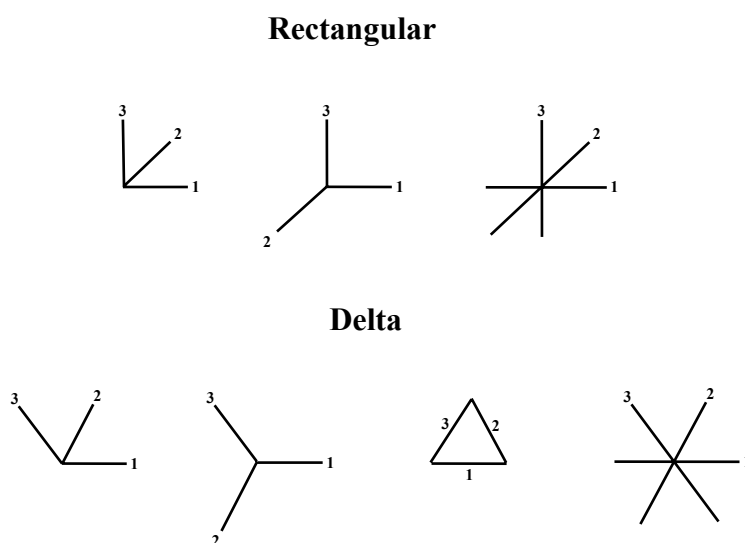


Figura 8.8 – Configurações de rosetas, geometricamente diferentes mas funcionalmente equivalentes, com arranjos rectangular e delta.

As rosetas constituídas por dois sensores são usadas unicamente quando são conhecidas as direcções das deformações principais. Assim, é necessário uma enorme precisão no alinhamento da roseta segundo as direcções principais, para além de ser extremamente sensível a tensões externas e irregularidades geométricas.

Quando um material se encontra num estado de deformação, o objectivo consiste em determinar as duas deformações e direcções principais, sendo necessário e suficiente fazer três medições independentes de deformação sobre três diferentes direcções. As equações que permitem calcular as deformações principais, usando rosetas com três sensores, derivam de uma expressão que relaciona a deformação local ( $\epsilon_\alpha$ ) no material, numa determinada direcção, em termos de duas deformações principais ( $\epsilon_x, \epsilon_y$ ), e o ângulo ( $\alpha$ ) que o eixo X da deformação principal  $\epsilon_x$  faz com essa direcção, figura 8.9.

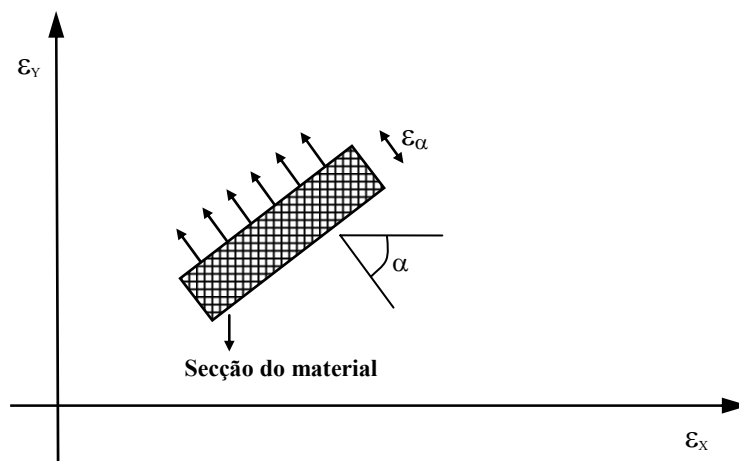


Figura 8.9 – Definição dos eixos principais.

Esta situação pode ser vista através do *Círculo de Mohr* [252] para deformações, como ilustra a figura 8.10. O eixo principal representa a deformação de corte ( $\gamma$ ):

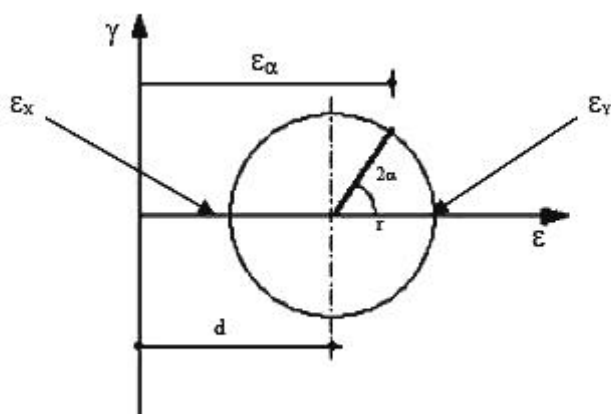


Figura 8.10 – Esquema do Círculo de Mohr com a representação da deformação local ( $\epsilon_\alpha$ ) em função das deformações principais ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ).

Assim, a deformação local em qualquer ângulo relativamente ao eixo principal X, é dada por:

$$\varepsilon_\alpha = d + r \cos(2\alpha) \quad (8.1)$$

onde  $d$  é a média das deformações principais e  $r$  é o raio do Círculo de Mohr, isto é:

$$d = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \quad (8.2)$$

$$r = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{2}$$

Estes parâmetros podem ser rescritos em termos de deformações principais, tal que:

$$\varepsilon_x = d - r \quad (8.3)$$

$$\varepsilon_y = d + r$$

No caso particular da roseta rectangular, o esquema do *Círculo de Mohr* pode ser visto pelos três eixos da roseta, conforme ilustra o esquema da figura 8.11:

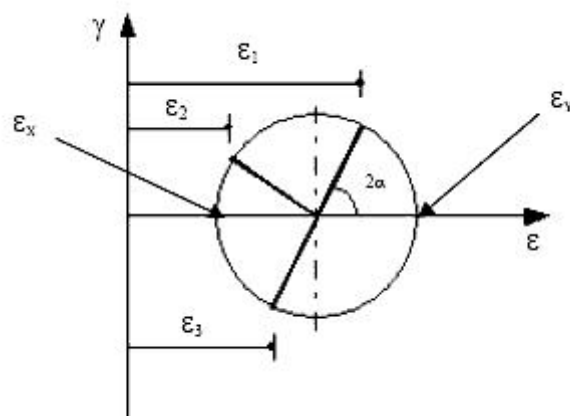


Figura 8.11 – Esquema do Círculo de Mohr com a representação da deformação local correspondente a cada um dos três sensores da roseta rectangular.



Desta forma, a deformação local (equação 8.1) ao longo de cada sensor pode ser rescrita tendo em conta os ângulos que cada um faz com o eixo principal X. Assim [252]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= d + r \cos(2\alpha) \\ \varepsilon_2 &= d + r \cos[2(\alpha + \beta)] \\ \varepsilon_3 &= d + r \cos[2(\alpha + 2\beta)]\end{aligned}\tag{8.4}$$

No caso em que  $\beta = 45^\circ$ , dado ser uma configuração rectangular ( $\beta$ , é o ângulo formado pelas direcções dos sensores), sendo também esta a orientação angular do sensor de Bragg 1 em relação à direcção principal X.

As rosetas em fibra óptica [254], à semelhança da roseta eléctrica, têm uma configuração baseada em três sensores onde cada um mede a respectiva deformação local. Como cada sensor corresponde a uma rede de Bragg, e estas estão numeradas de acordo com a orientação da figura 8.11 (sentido contrário ao dos ponteiros do relógio), os parâmetros  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  são determinados através do desvio da ressonância de Bragg para cada sensor. Assim, conhecendo  $\beta$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$ , é possível determinar os parâmetros da deformação  $d$ ,  $r$  e  $\alpha$ , através das equações 8.4, tal que:

$$d = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}\tag{8.5}$$

$$r = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2 \cos(2\alpha)} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \left\{ 1 + \left[ 2 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} - 1 \right]^2 \right\}^{1/2}\tag{8.6}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right)\tag{8.7}$$

Finalmente, através das equações 8.3, as deformações principais podem ser determinadas da seguinte forma:

$$\varepsilon_{X,Y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (8.8)$$

onde os sinais  $\pm$  significam que  $\varepsilon_X$  e  $\varepsilon_Y$  são as deformações principais máxima e mínima, respectivamente.

Considerando que o material de teste é homogéneo, isotrópico e elástico, (dado que a roseta foi colada a uma placa em alumínio) tal que existe uma relação linear entre a deformação e a tensão, as deformações principais podem ser convertidas em tensões principais, usando a Lei de Hooke na forma biaxial. Resultam, assim, as expressões para as tensões principais  $\sigma_X$  e  $\sigma_Y$ :

$$\sigma_X = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_X + \nu \varepsilon_Y) \quad (8.9)$$

$$\sigma_Y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_Y + \nu \varepsilon_X) \quad (8.10)$$

onde  $E$  é o *módulo de Young* e  $\nu$  é o *coeficiente de Poisson* do material em teste. A direcção dos eixos principais das tensões é coincidente com as deformações principais.

No caso da roseta delta, obtêm-se expressões semelhantes para as deformações principais através das equações 8.4, considerando que  $\beta=120^\circ$ .

### 8.3.2 – Concepção e resultados das rosetas com configuração rectangular

No início do estudo com as rosetas ópticas, realizaram-se algumas construções com tamanhos relativamente grandes. Com o avançar dos ensaios foi-se reduzindo esse tamanho e, progressivamente, foi também melhorando o seu conhecimento, assim como a melhoria de resultados obtidos.

Uma das configurações inicialmente estudadas, figura 8.12, foi realizada em tecido de carbono “twill” 2/2, feita em autoclave. Consistiu em duas camadas de material compósito, em que uma fibra óptica com três redes de Bragg inscritas foi embebida entre as camadas do compósito. As dimensões desta placa são relativamente grandes de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ . Dado o cruzamento da fibra óptica entre as camadas de material compósito, a placa apresentava-se com uma maior espessura nessas zonas.

Nesta configuração a fibra óptica possuía três redes de Bragg gravadas, permitindo dessa forma elaborar uma configuração tal como se apresenta, e assim ter um só ponto de leitura para a monitorização das redes.

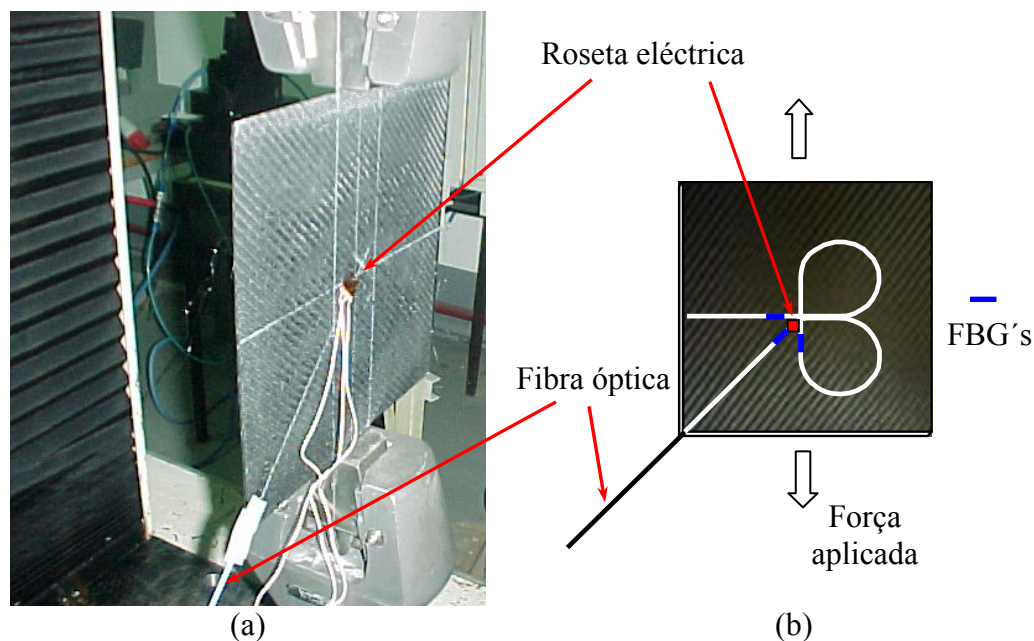


Figura 8.12 – (a) Set-up de ensaio em tensão. (b) Configuração da roseta.

A placa compósita com a roseta óptica embebida foi monitorizada com o segundo set-up de monitorização, apresentado no capítulo 5, para registar os comportamentos das redes de Bragg. Enquanto que a roseta eléctrica foi monitorizada com o Sipder8, equipamentos já anteriormente apresentados. Esta última foi posicionada tal como se apresenta na figura 8.12, sensivelmente no espaço compreendido entre as posições das redes de Bragg e o cruzamento da fibra óptica, resultante da sua configuração, o que

leva a um posicionamento em cima da fibra que se encontra a 45° com a tensão aplicada. Na figura 8.12(b), não estão representadas as zonas de fixação para as garras da máquina de ensaios, no entanto elas foram realizadas juntamente com a placa para ensaio, sem necessidade de colagens ou fixações adicionais, e consistiram em abas com 50×50 mm<sup>2</sup>.

Após o embebimento a roseta apresentou os seguintes espectros em reflexão, das redes de Bragg embebidas, figura 8.13.

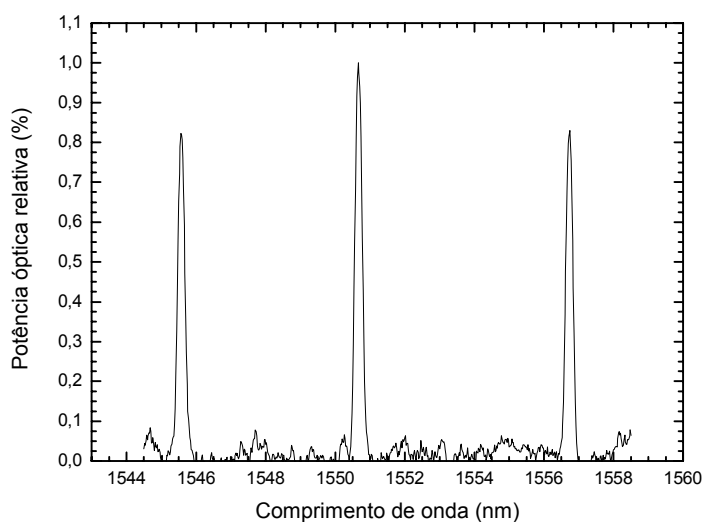


Figura 8.13 – Espectros em reflexão das redes de Bragg embebidas.

Uma vez montado o set-up experimental, foram realizados alguns ensaios de tracção, por patamares, com aplicação de uma força progressiva de aproximadamente 750 N, até um valor próximo de 6750 N, figura 8.14. Os resultados obtidos embora não sejam excepcionalmente bons, mostram que o sensor posicionado a 0° (i.e. na direcção do carregamento) tem um bom comportamento, já os restantes sensores, não conseguiram acompanhar, ou responder correctamente às solicitações impostas de uma forma tão fiel, como comprova a comparação feita à deformação medida pela roseta eléctrica colocada à superfície da placa numa posição muito próxima dos sensores ópticos.

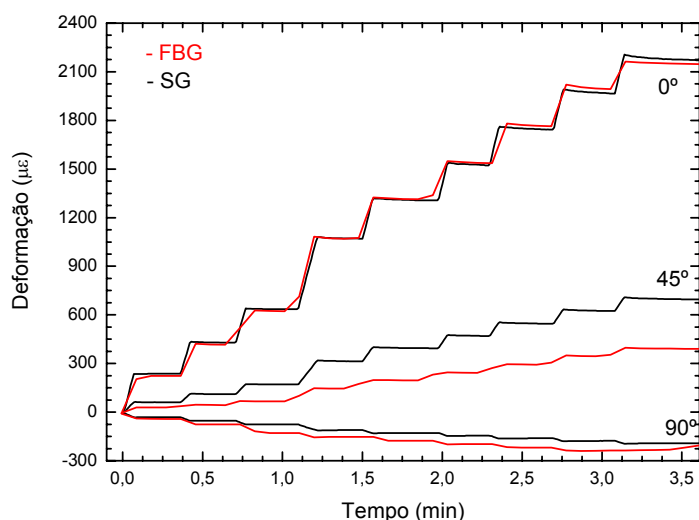


Figura 8.14 – Comportamento da roseta às solicitações impostas, quando comparada com a roseta eléctrica.

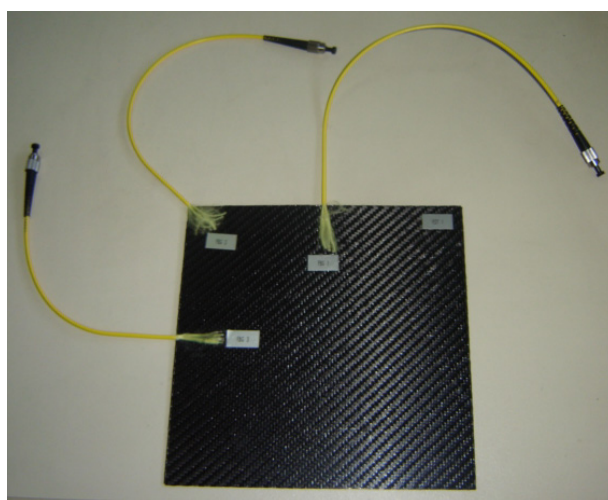
O embebimento obtido com os sensores, tendo em consideração os espectros ópticos obtidos por reflexão, apresentados na figura 8.13, parecem bem conseguidos, no entanto, quando a placa é solicitada em tracção os sensores não apresentam um comportamento correspondente, na sua totalidade, às solicitações impostas.

Conforme se pode observar pelo comportamento dos sensores nas três direcções estabelecidas, em função da força aplicada, obtém-se um bom comportamento do sensor a 0°, na direcção da força exercida. No entanto, os comportamentos dos sensores colocados a 45° e 90°, não apresentam a mesma deformação que os seus congéneres eléctricos, embora tenham a mesma tendência. É de salientar que a 45°, o sensor óptico apresenta sempre uma deformação inferior à do eléctrico. Tal poderá ser explicado pelo efeito de reforço localizado efectuado pela roseta extensiométrica colocada mesmo por cima deste, se bem que separados de 200  $\mu\text{m}$ , e que pode ter influenciado a componente da força segundo aquela direcção. Em contrapartida, a situação a 90° é diferente, com a roseta óptica a apresentar valores de deformação sempre ligeiramente superiores à correspondente eléctrica. Parecendo mesmo verificar-se que o sensor embebido denota maior contracção na direcção a 90° do que o sensor colocado à superfície da placa. Há,

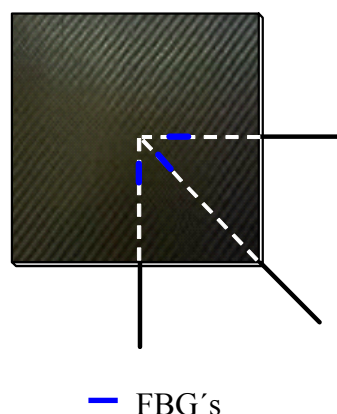
ainda, neste tipo de placas sensoras, algum trabalho a realizar, de forma a resolver estas situações.

### Comportamento de uma outra roseta rectangular

A placa sensora apresentada foi realizada com tecido de carbono “twill” 2/2, feita com saco de vácuo no autoclave, com embebimento de três sensores individuais por forma a compor uma roseta com uma configuração rectangular, figura 8.15, cujos espectros já foram mostrados no capítulo 6, quando se apresentaram alguns dos resultados por embebimento dos sensores, figura 6.17(c). A configuração e o posicionamento dos sensores é apresentado na figura 8.15(b). Com esta configuração, obtêm-se os comportamentos individuais dos sensores, nomeadamente do sensor posicionado a  $45^\circ$  com a força, mas também, e simultaneamente, a  $45^\circ$  com o tecido do material compósito.



(a)



(b)

Figura 8.15 – (a) Roseta com sensores individuais. (b) Posicionamento dos sensores ópticos.

A placa em questão foi solicitada à flexão com o set-up utilizado nos ensaios dinâmicos às placas laminadas sensoras, apresentadas no capítulo 7. Para a monitorização dos sensores de Bragg, foi usado o segundo set-up de monitorização óptico, descrito anteriormente no capítulo 5. O posicionamento da placa no dispositivo de ensaio permite à fibra ótica A, acompanhar o deslocamento da placa até à sua flexão máxima, estando posicionada a  $90^\circ$  com o plano que passa pela fibra ótica C, sendo

este perpendicular à placa compósita, figura 8.16. O deslocamento máximo alcançado pela fibra, ou flecha, foi de 20 mm, em relação à posição inicial, medido com um comparador, cuja resolução é de 0,01 mm.

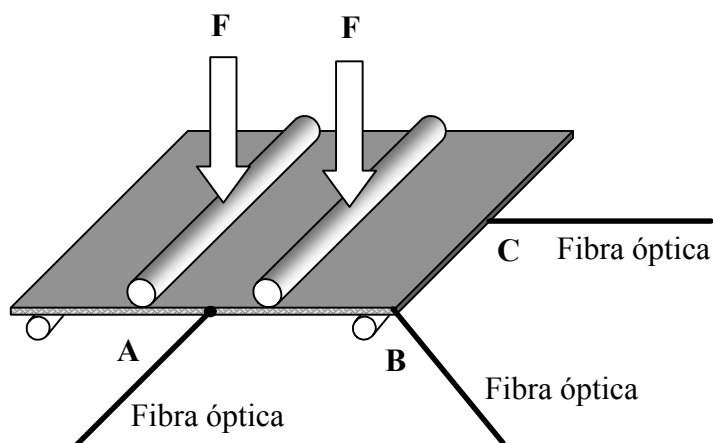


Figura 8.16 – Flexão em quatro pontos realizada à roseta rectangular.

Na figura 8.17, pode-se observar o comportamento do sensor da fibra A, para três valores diferentes da flecha. Verifica-se que este sensor praticamente não sofre qualquer deformação assinalável. E isto acontece porque ele acompanha integralmente o movimento da placa, logo as forças a que está potencialmente sujeito são apenas de compressão lateral, mas mesmo essas não são relevantes já que não introduzem qualquer alteração à forma do espectro obtido.

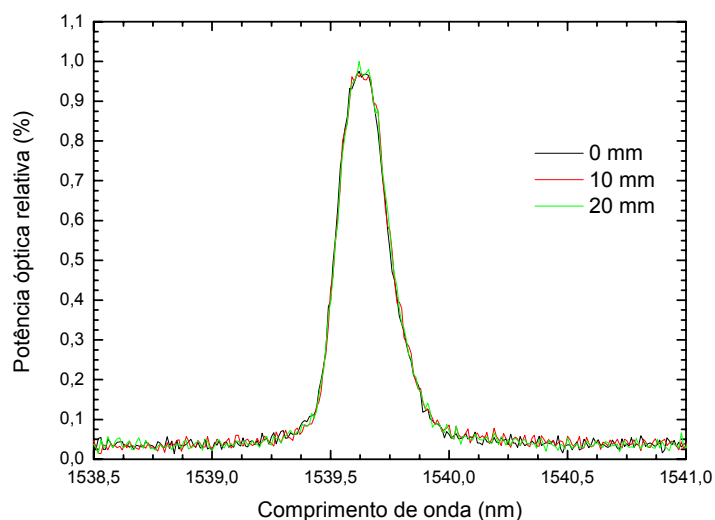
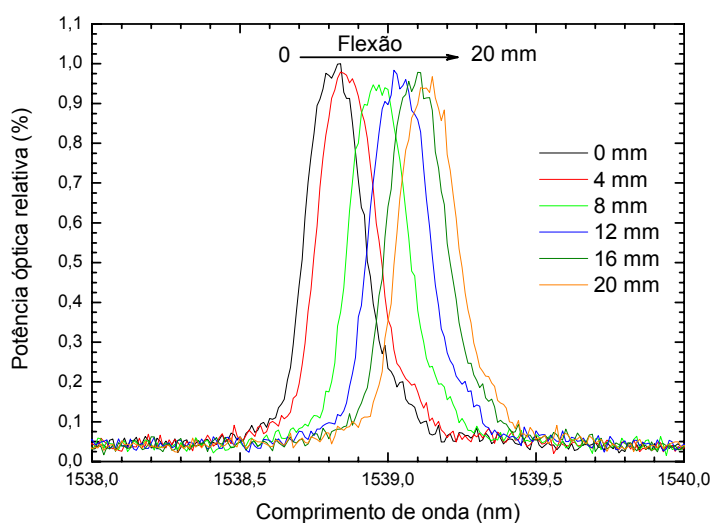
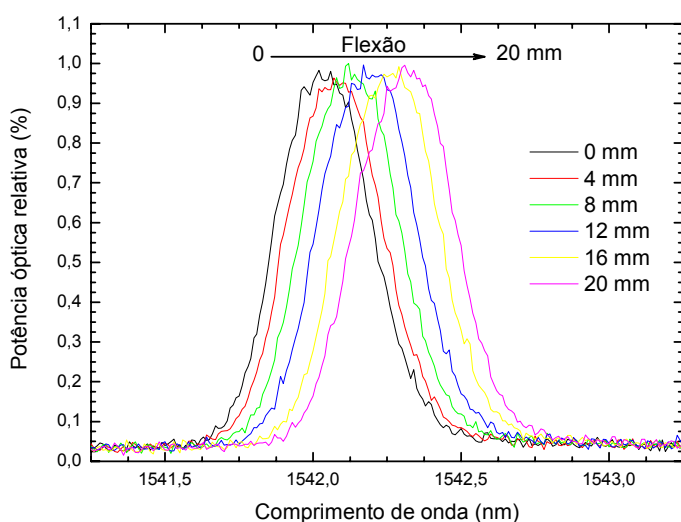


Figura 8.17 – Comportamento da rede de Bragg em A.

Na figura 8.18, observa-se o comportamento das redes de Bragg, posicionadas na fibra B e C, com a flexão. A sensibilidade dos sensores à flexão, parece ser idêntica, os espectros de ambos os sensores têm um deslocamento para maiores comprimentos de onda, o que significa que ambos sofreram uma deformação por distensão, sendo que a variação do comprimento de onda entre a posição inicial e a final da flexão, seja superior para o sensor da fibra C, com 0,35 nm, contra os 0,31 nm para a fibra B.



(a)



(b)

Figura 8.18 – (a) Variação do comprimento de onda na rede Bragg da fibra B. (b) Variação do comprimento de onda da rede de Bragg da fibra óptica C. Em função da flexão aplicada.



No entanto, a diferença entre ambos esperava-se que fosse maior, dado que o sensor a 45°, estaria sujeito a uma componente de força substancialmente menor. Desta forma o entrelaçado do tecido de reforço com um ângulo de 45° com o sensor parece influenciar o comportamento do sensor.

O comportamento do  $\lambda_B$  com a flexão, no sensor da fibra B, denota uma potência óptica inconstante, muito possivelmente pelo facto de estar embebido entre fibras de reforço com uma orientação a 45° destas, tanto das da teia como da trama. Dado que o tecido é equilibrado, a acção destas sobre a fibra óptica deveria ser igual e constante, no entanto devido ao facto da fibra óptica poder estar mais perto de uma das orientações das fibras de reforço, estas podem estar a influenciar a rede de Bragg, de forma a provocar uma ligeira perda na potência óptica. Verificando-se que com um aumento da flecha o constrangimento anterior deixa de actuar, aumentando novamente a potência óptica, embora para valores ligeiramente inferiores.

Efectuando uma representação da variação do comprimento de onda,  $\lambda_B$ , com a flexão sofrida pela placa, é possível observar o andamento dos sensores. Observando os resultados obtidos, figura 8.19, verifica-se que o comportamento do sensor posicionado na fibra óptica C e o posicionado na fibra óptica B, são muito idênticos, embora se pudesse pensar que o sensor da fibra C tivesse uma deformação bastante superior. No entanto as diferenças são mínimas. E o sensor posicionado em A tem um andamento praticamente nulo.

Desta forma o sensor posicionado na fibra C, e que esteve sujeito à maior deformação teve uma variação com a flexão de,  $\Delta\lambda_B/\text{Flexão} = 0,018 \pm 9,73 \times 10^{-4}$  (nm/mm), e muito próximo deste valor está o sensor posicionado na fibra B, com uma variação dada por:  $\Delta\lambda_B/\text{Flexão} = 0,016 \pm 9,64 \times 10^{-4}$  (nm/mm). Muito longe destes valores esta o sensor da fibra A, cujos valores são muito próximos de zero,  $\Delta\lambda_B/\text{Flexão} = 0,545 \pm 0,624$  (pm/mm).

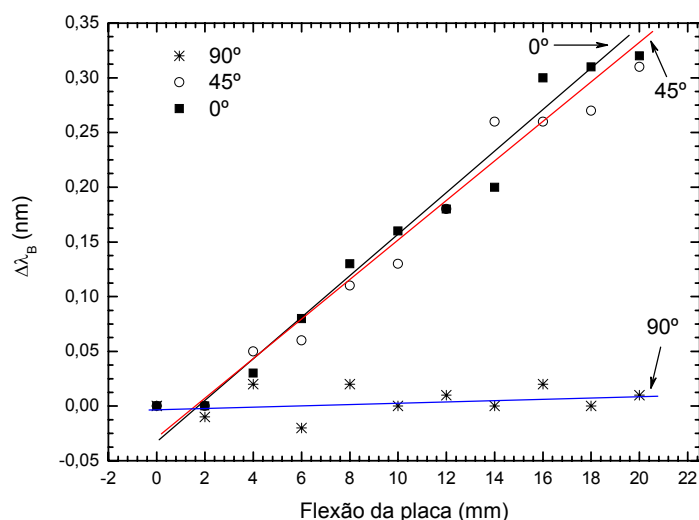


Figura 8.19 – Variação do comprimento de onda dos sensores com a flexão.

### 8.3.2.1 – Discussão

É de facto de observar que o comportamento das rosetas ópticas com este tipo de configuração se apresenta com comportamentos um pouco díspares. Na direcção em que a força actua, existe uma boa relação da variação do comprimento de onda de Bragg com a deformação, no entanto, nas restantes direcções, isso já não acontece. Situação que foi verificada quer nas placas apresentadas, mas também em outras, cujos valores não se apresentaram. É um facto que, a concepção das rosetas em material compósito apresentadas, ainda não reflectem as melhorias introduzidas e descritas no capítulo 6, no que concerne às alterações das metodologias de produção de placas sensoras laminadas, sendo que os resultados obtidos poderão ser um reflexo disso mesmo, no entanto, o comportamento das fibras de reforço colocadas a 45° com a fibra óptica serão motivo de investigações futuras. Dado que, seria de esperar que pelo facto de não existir qualquer extensómetro colado por cima da fibra, assumindo que poderia ser um motivo para alguma discrepância, os resultados seriam, potencialmente, parecidos com os obtidos anteriormente, mas de facto isso não aconteceu. Há, assim, uma necessidade de futuramente complementar este tipo de informação, relativamente ao posicionamento dos sensores de Bragg em relação ao ângulo das fibras de reforço.

### **8.3.3 – Concepção de uma roseta com configuração “delta” (rectangular transformada)**

Os dados obtidos pelas rosetas ópticas em material compósito anteriores, não nos permitem utilizá-las em substituição das rosetas extensométricas. A informação dada por estas rosetas não foi satisfatória. Assim houve a necessidade de conceber uma nova roseta, em que o principal objectivo foi criar um formato que permitisse utilizar uma única fibra óptica, com três sensores inscritos, mas que não apresentasse cruzamentos de fibra óptica embebidos no material compósito, e tendo em particular atenção em manter uma espessura de placa compósito o mais fina possível, e além disso tentar aplicar as melhorias introduzidas na metodologia de produção usada com as placas laminadas. Um segundo objectivo era torná-la o mais maneável possível, removendo todos os excessos de material, que não fossem considerados necessários. Num terceiro item, pretendia-se obter uma roseta com dimensões reduzidas.

A placa sensora que se apresenta tem uma configuração rectangular base. No entanto, o terceiro sensor tem um posicionamento diferente das configurações anteriormente apresentadas, o que visualmente dá um aspecto de uma configuração delta. A placa foi realizada em fibra de carbono/epóxico, em autoclave, tendo em atenção todas as alterações e cuidados que anteriormente foram referidos na elaboração das placas laminadas.

Pelo facto da fibra óptica não se cruzar entre as camadas de material compósito, a placa apresenta uma espessura de 0,4 mm, com um comprimento máximo 90 mm, e uma largura de 50 mm. Dado que não possui a parte interior, a roseta é muito flexível. As secções onde estão embebidas as redes de Bragg têm a mesma largura, figura 8.20(a).

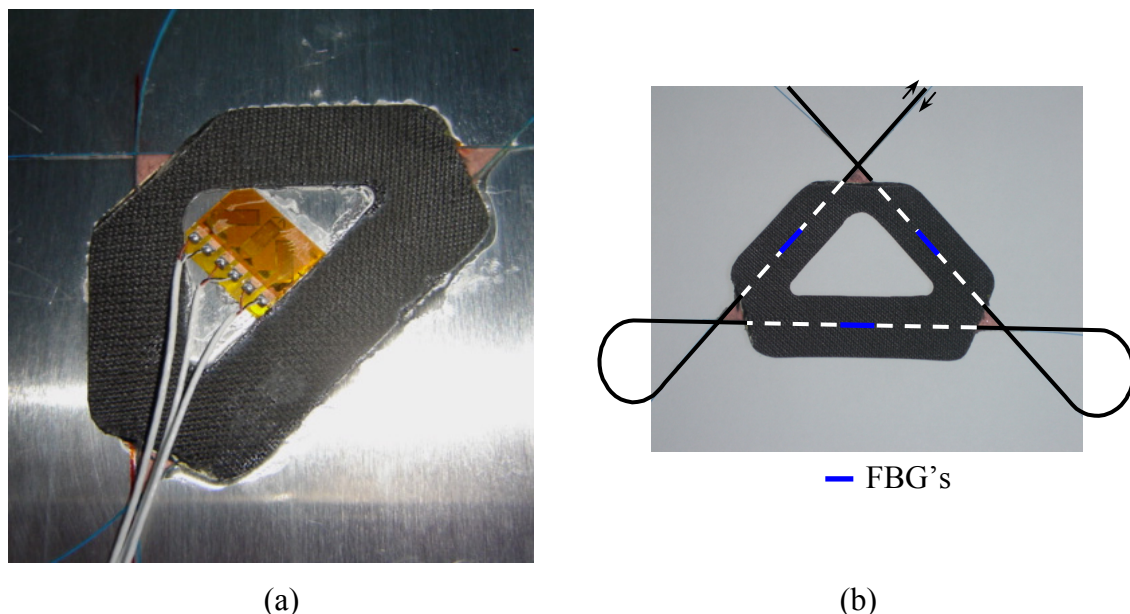


Figura 8.20 – (a) Roseta óptica embebida. (b) Posicionamento dos sensores.

No processo de fabrico, foi colocado em ambas as faces da roseta um filme absorvente, “peel-ply”, que para além de facilitar a desmoldação, também permite absorver os excessos de resina e, para além disso, criar uma superfície que auxilia e facilita a adesão da roseta nos processos de colagem, nas superfícies a implementar. Permitindo desta forma que a superfície do material obtido fique com uma pequeno relevo uniforme, o que possibilitará o recurso a uma pequena quantidade de material adesivo, e assim conseguir obter uma boa aderência.

Para a monitorização dos sensores da roseta, foi utilizado o quarto e último set-up de monitorização de redes de Bragg, apresentado no capítulo 5. As aquisições foram realizadas com uma taxa elevada, comparativamente com o sistema anterior, em alguns dos acontecimentos com aquisições a 5 kHz, sendo que, a maior parte foi realizada a uma taxa de 1 kHz. No entanto, o ruído introduzido nessas situações sendo, também elevado, torna-se necessário garantir que as variações sejam significativas. Para aquisição dos sinais provenientes da roseta eléctrica, foi utilizado o Sipder8. Dado que foram realizados alguns ensaios de tracção foi também utilizada a máquina de ensaios, INSTRON, com uma velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min.

A placa sensora foi colada a uma placa de teste de alumínio, com as dimensões de  $305 \times 155 \times 3 \text{ mm}^3$ . A roseta em material compósito foi posicionada de forma a ter um

sensor alinhado com o eixo central do comprimento, um outro alinhado com o eixo da largura e por fim um terceiro sensor posicionado a 45° com um dos anteriores, figura 8.21.

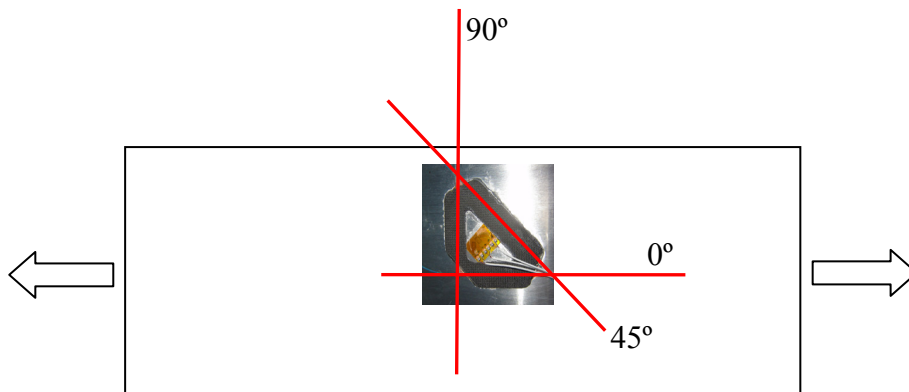


Figura 8.21 – Esquema da montagem da roseta na placa de teste.

### 8.3.3.1 – Comportamento à tracção

A placa foi sujeita a uma força progressiva até aos 7 kN. O limite da força aplicada foi escolhido, por se considerar que até este valor está perfeitamente garantido, com a condição da placa de teste ter um comportamento elástico. Na figura 8.22, pode ser observado o comportamento dos sensores em função do tempo. No qual se pode verificar a variação do comprimento de onda com o decorrer do ensaio.

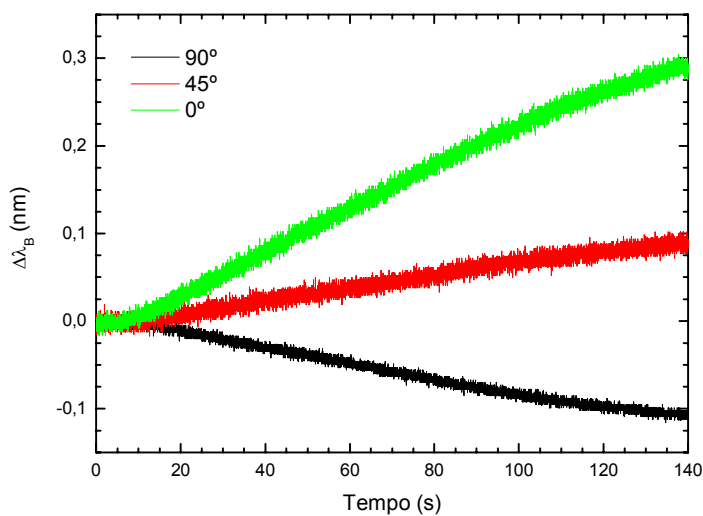


Figura 8.22 – Variação do comprimento de onda com o decorrer do ensaio.

Comparando as duas rosetas utilizadas nos ensaios, observa-se que na direcção da força aplicada, e em toda a extensão do ensaio, o sensor óptico e o sensor eléctrico têm um comportamento semelhante, figura 8.23.

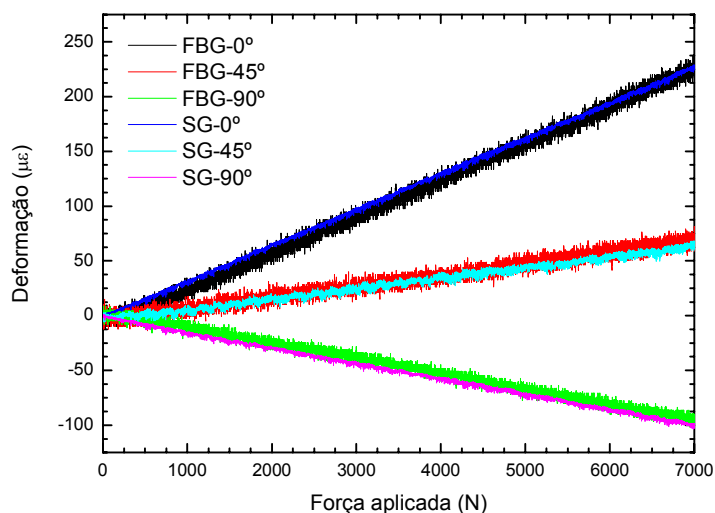


Figura 8.23 – Deformação medida pelas rosetas em função da força aplicada.

Verifica-se que as deformações medidas pelos sensores nas três direcções são semelhantes e atingem o mesmo valor em todas as sollicitações realizadas. Observa-se para o sensor a 45°, uma ligeira tendência com o aproximar do limite do ensaio com os valores registados pelo extensómetro a serem ligeiramente inferiores, figura 8.23. Na direcção a 90°, a situação é ligeiramente diferente com o extensómetro a registar valores de deformação sempre ligeiramente superiores aos registados pelo sensor óptico, embora essa diferença seja mantida do principio ao fim do ensaio. Verificando-se um comportamento quase linear em todas as direcções.

O comportamento individual dos sensores ópticos nas três direcções é considerado na figura 8.24. Os resultados obtidos enaltecem a boa correlação entre os valores medidos pelos dois sensores em deformação, sendo a direcção de 0°, a que apresenta melhores resultados.

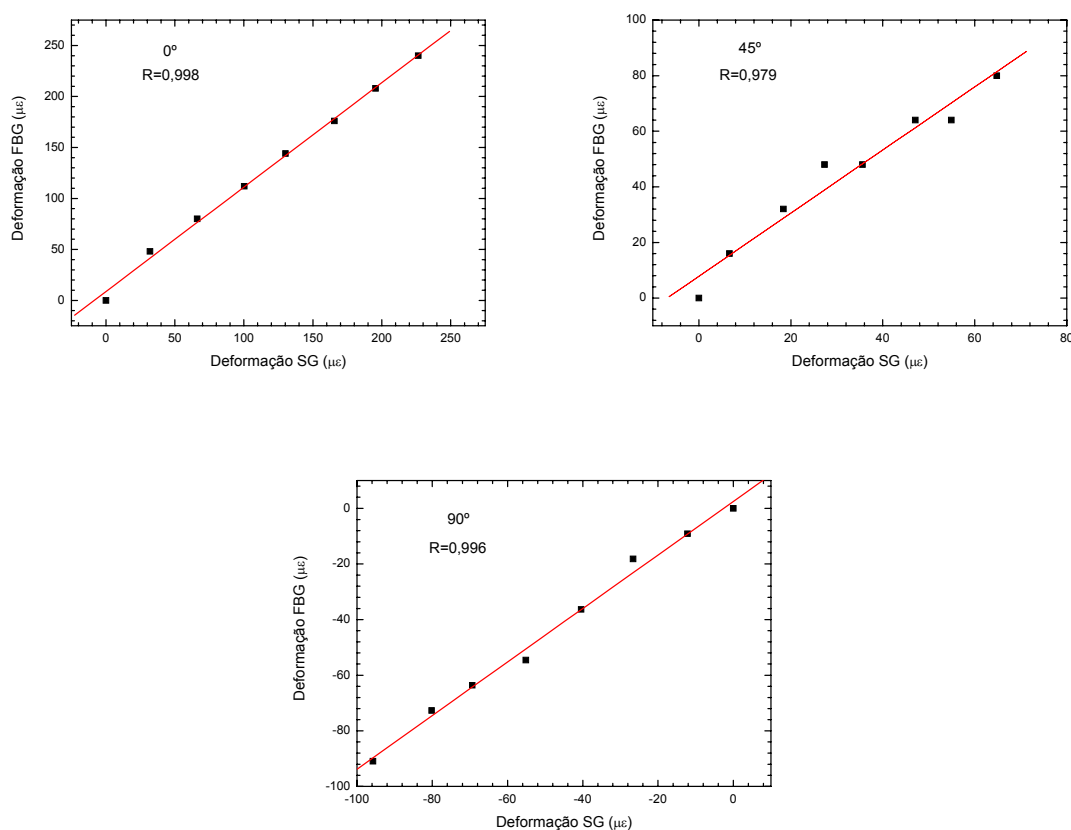


Figura 8.24 – Correlação entre as deformações das rosetas na direcção a 0°, na direcção a 45° e a 90°.

Observando o comportamento de  $\lambda_B$ , nas três direcções consideradas, em função da carga aplicada, sendo agora de 1000 N em 1000 N, verifica-se que na direcção da força o desvio é efectivamente maior, há um maior deslocamento do comprimento de onda em função da sua posição inicial. Foi observado que o deslocamento imposto não altera a forma do espectro, pelo que a largura a meia altura dos espectros, nesta direcção, sensor a 0° com a força aplicada, tem um alargamento muito reduzido, no início do ensaio o valor era de 0,167 nm, e no fim apresentou um valor de 0,170 nm, ou seja uma variação de 0,003 nm. Para a força aplicada, o pico central deslocou-se de 0,3 nm, valor que corresponde a sensivelmente 225  $\mu\epsilon$ , figura 8.25. Contudo é verificado um ligeiro decréscimo da potência óptica registada pelo sensor, logo no início da carga, mas esse novo valor é mantido ao longo do resto do ensaio.

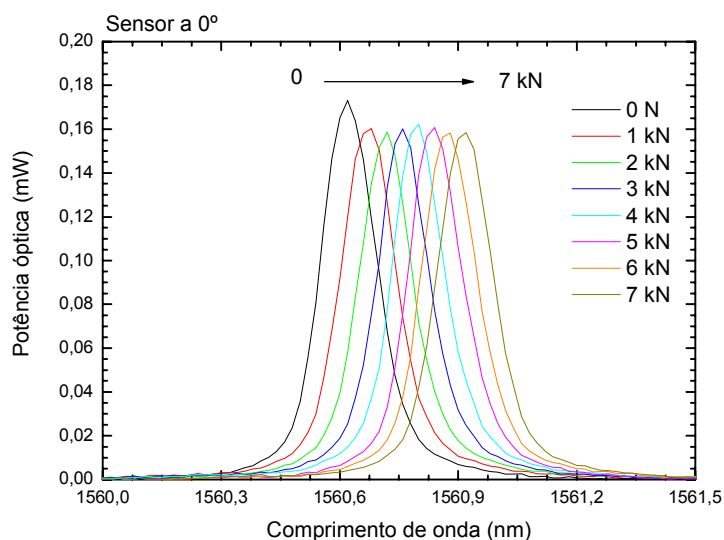


Figura 8.25 – Variação do  $\lambda_B$  com a força aplicada, a 0°.

A variação do sensor posicionado a 45° é menor, do que a verificada a 0°. A figura 8.26 mostra a variação do espectro ao longo do ensaio. Nesta direcção o valor da largura a meia altura do espectro era de 0,160 nm, antes da aplicação do carregamento, e quando a força atingiu os 7 kN, o valor foi de 0,162 nm.

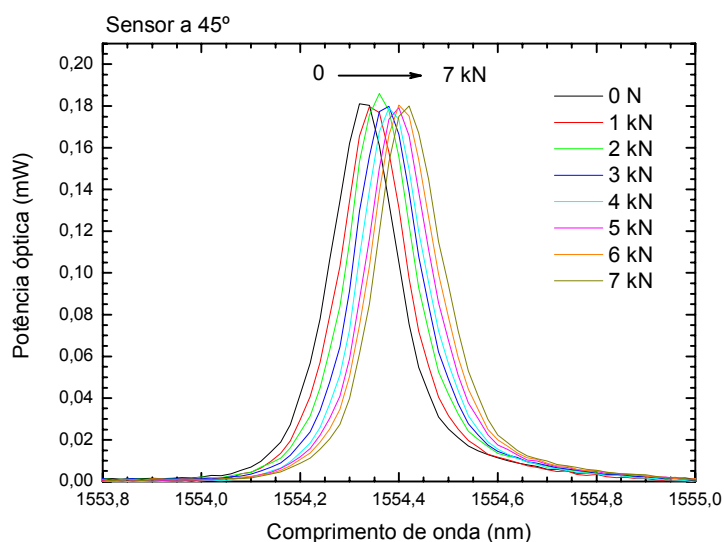


Figura 8.26 – Variação do  $\lambda_B$  com a força aplicada, a 45°.



Observa-se assim uma variação de 0,002 nm. No entanto, o deslocamento verificado para o  $\lambda_B$ , foi de 0,1 nm, sendo estes valores menores do que anteriormente. Neste sensor não se observou perdas de potência óptica, ao contrário do anterior. No entanto, a meio do ensaio, mas ainda numa fase inicial, houve um ligeira subida da potência óptica que poderá ser devida a uma acomodação da posição das fibras de reforço, por forma a “estrangular” menos a passagem da luz na fibra óptica.

Um comportamento ligeiramente diferente teve o sensor posicionado a 90°, figura 8.27, dado que o deslocamento do comprimento de onda central da banda espectral reflectida, foi no sentido descendente, o que traduz uma compressão por parte do sensor. Ou seja, a rede de Bragg, sofreu um ligeiro decréscimo do período da rede,  $\Lambda$ .

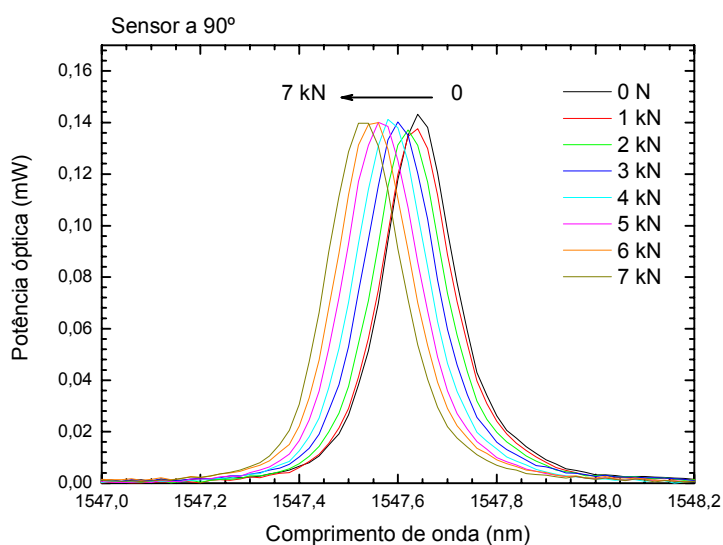


Figura 8.27 – Variação do  $\lambda_B$  com a força aplicada, a 90°.

Os valor obtido para a largura a meia altura, na situação inicial de ausência de carga, foi de 0,161 nm, sendo que, no fim da aplicação da carga de 7 kN, essa grandeza apresentou o valor de 0,177 nm, consequentemente obtém-se uma variação de 0,016 nm, entre as posições extremas. A variação do  $\lambda_B$  nesta direcção, é de 0,1 nm.

### 8.3.3.2 – Discussão

Os dados obtidos com esta configuração da roseta evidenciam um bom embebimento conseguido com as redes de Bragg em fibra óptica. Tanto na tracção como na flexão, os sensores ópticos e eléctricos têm desempenhos semelhantes, e acrescido do facto dos espectros em reflexão das redes apresentarem um comportamento sem perturbações ou alterações significativas, quando sujeitos às solicitações que lhes foram impostas. Significa com isso que as fibras de reforço não estão a influenciar directamente o desempenho das redes, exercendo pressão localizada ou mesmo transversal, sobre a rede, pelo menos para os valores de carga utilizados, e isso é visível pelos valores quase constantes da largura a meia altura, assim como pela potência óptica, praticamente constante ao longo dos ensaios. E, refira-se que foram realizados vários carregamentos sucessivos, sem que se tenha verificado qualquer alteração dos espectros ópticos. Assim, poder-se-á dizer que se obteve uma concepção e embebimento otimizado para este tipo de configuração de sensor.

### 8.3.3.3 – Comportamento à flexão

À semelhança de ensaios anteriores, esta roseta montada na placa de ensaios. Foi, também, sujeita a ensaios de flexão em quatro pontos. Desta feita com o auxílio da INSTRON, à qual foi imposta uma velocidade de 1 mm/min. O comportamento dos três sensores foi bem perceptível e distinto, traduzindo efectivamente o comportamento da placa de ensaios, figura 8.28.

Verificou-se que os valores da deformação são muito baixos, embora isso seja compreensível dada a pequena flexão que foi imposta. A flecha registada foi de 2,7 mm sensivelmente. A experiência em si mostra a sensibilidade que a roseta apresenta, dado que para aquela flexão é perfeitamente observável a variação dos comprimentos de onda das redes embebidas, como função do comportamento da placa de teste, no gráfico não aparecem representadas as deformações obtidas pela roseta extensométrica, dado que os resultados são em tudo semelhantes aos apresentados na figura 8.23, com os sensores a terem o mesmo comportamento nas três direcções.

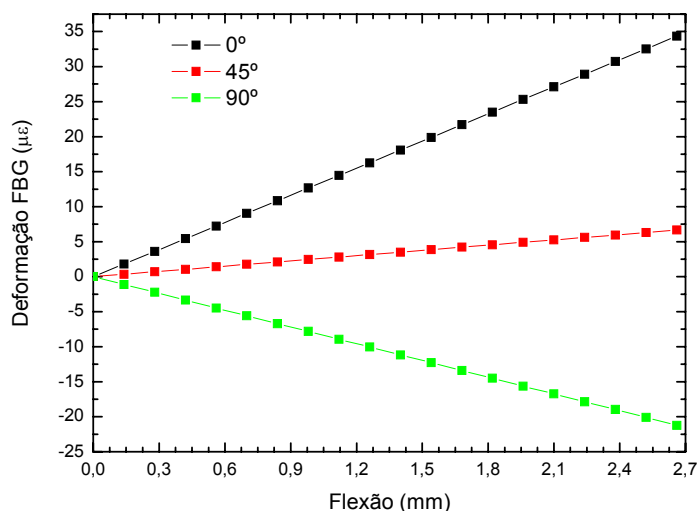


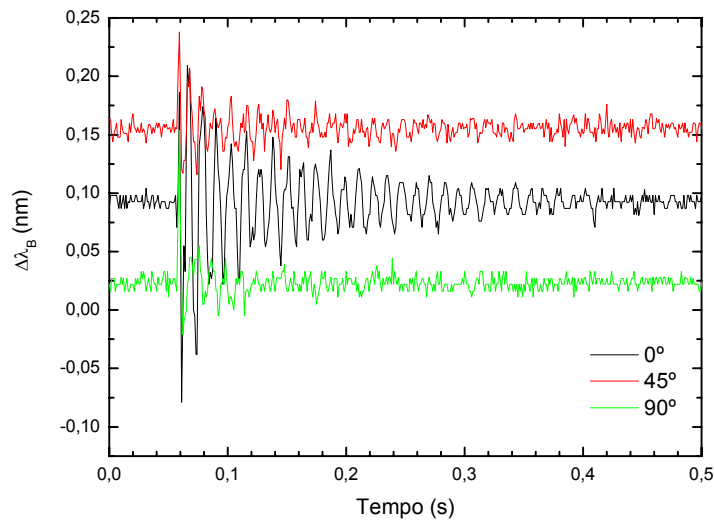
Figura 8.28 – Deformação registada em função da flexão imposta.

Para a flexão imposta, o comportamento da roseta é linear, nas três direcções. O comportamento da roseta colada à placa de alumínio mostra ser bastante distinto do comportamento apresentado pela roseta rectangular anterior. Isso poderá ser justificado pelo facto da roseta ser mais sensível, e estar completamente solidária com a placa de teste, mas também por estar a reflectir o comportamento da placa de teste e a variação de comportamento que ela tem.

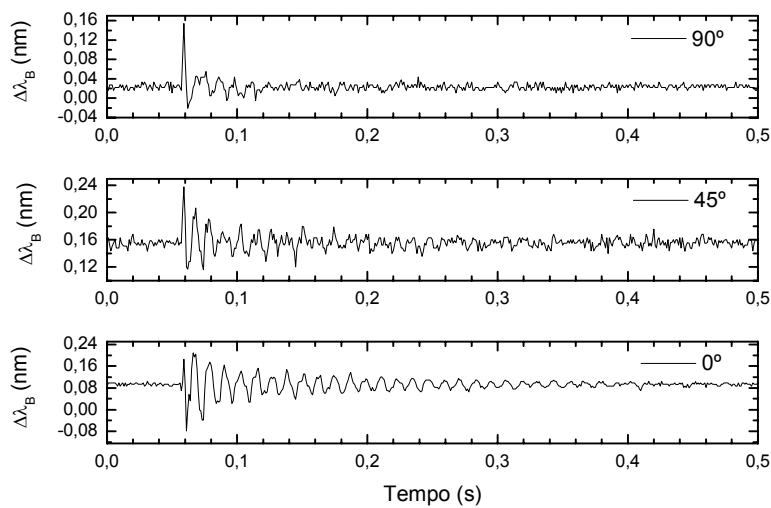
#### 8.3.3.4 – Comportamento à vibração

A placa sensora foi submetida a impactos de baixa frequência evidenciando um comportamento interessante em termos de sensibilidade à vibração, ou melhor, à detecção de baixas vibrações causadas por impactos de baixa velocidade. Situação que apresenta um bom potencial de aplicação na possível localização de impactos.

Duas situações diferentes foram analisadas. No primeiro caso, a placa de ensaio está encastrada numa extremidade, sendo a outra deixada livre. Foi aplicado um toque com um martelo impactor não instrumentado (i.e. sem captor de força e sem acelerómetro), cujos resultados são apresentados na figura 8.29.



(a)

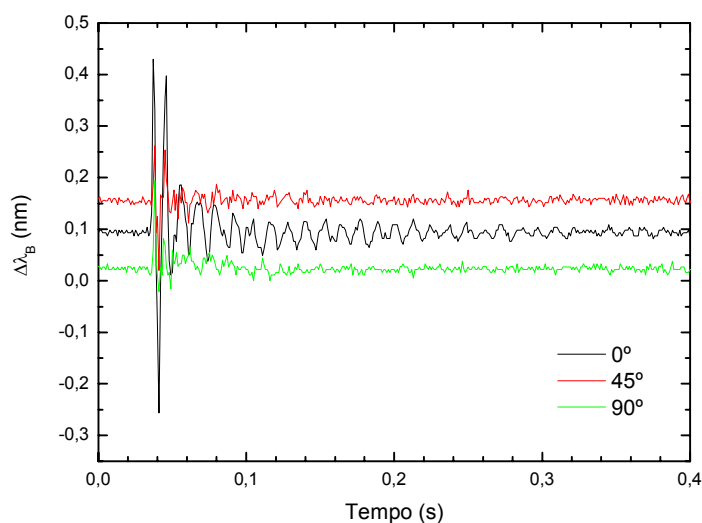


(b)

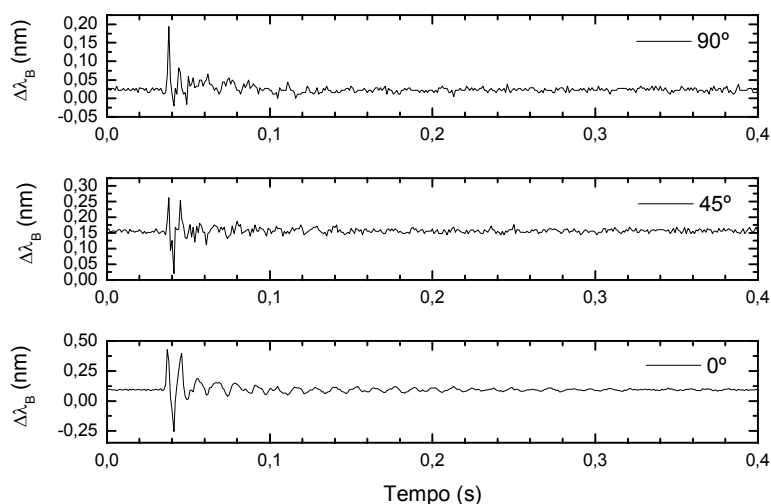
Figura 8.29 – (a) Vibração registrada pela roseta, quando a placa de teste está encastrada numa das extremidades. (b) Observação isolada dos sensores.

Pode-se, assim, observar o comportamento isolado de cada um dos sensores quando detectaram a vibração. Observa-se que os 3 sensores têm as mesmas tendências que apresentaram durante o ensaio de tracção, ou seja, o sensor posicionado a  $0^\circ$  com a direcção do comprimento da placa, regista os maiores valores de deformação inicial, e apresenta uma amortecimento da amplitude de vibração mais lento do que os outros dois sensores. Verificando-se que o sensor posicionado a  $90^\circ$ , ou seja, na direcção da largura da placa, é aquele que após o impacto tem um decaimento mais rápido da

deformação, sendo que o valor atingido inicialmente é também ele mais baixo. Desta forma, o sensor posicionado a  $45^\circ$ , regista valores intermédios, aos dois sensores anteriores, ou seja, a amplitude inicial da deformação atingida e consequente redução, entre os dois sensores anteriores. A vibração registada, tem uma duração de 0,45 segundos, até se extinguir completamente.



(a)



(b)

Figura 8.30 – (a) Vibração registada pela roseta, quando a placa de teste se encontra apoiada na segunda extremidade. (b) Observação isolada dos sensores.

Na segunda configuração, a extremidade livre encontrou-se apoiada. Um impacto foi realizado na mesma posição que anteriormente, sendo a resposta da roseta apresentada na figura 8.30.

O resultado desta nova situação foi semelhante ao anterior, figura 8.29, embora as deformações iniciais sejam bem maiores, o seu decaimento é muito mais rápido, principalmente ao registo inicial, de forma que após a detecção do impacto, e ao fim de 0,2 segundo, já quase não é possível observar a ocorrência de qualquer impacto que tenha ocorrido na placa de teste. O material usado para provocar a vibração foi exactamente o mesmo, e tanto quanto possível com igual quantidade de movimento.

#### **8.3.3.5 – Conclusão**

Os dados evidenciados pela roseta na situação de detecção de vibrações de baixa frequência, nas diferentes condições de fronteira observadas, permitem pensar numa aplicação desta na localização de impactos, com a colocação das rosetas em pontos estratégicos da superfície e, posteriormente, com recurso às diferenças de tempos de chegada das vibrações às rosetas, poder-se chegar à localização exacta do impacto, e correspondente amplitude.

Uma das situações um pouco mais avançada, para este tipo de aplicações, seria completar um sistema desta natureza com algoritmos de optimização, que funcionando interligados com dispositivos de actuação, ou mesmo de simples aviso, podem complementar um sistema de segurança de infra-estruturas de alto risco, nomeadamente zonas que não sejam propícias à presença da tensão eléctrica, como sejam as condutas de transferência de combustíveis, os próprios tanques de combustível, nomeadamente nas aeronaves, assim como de substâncias altamente inflamáveis.

## 8.4 – Resultados do embebimento de um interferómetro de Fabry-Pérot

### 8.4.1 - Introdução

A monitorização da integridade estrutural de estruturas compósitas pode ser realizada por medições de deformação. No entanto, se estas decorrerem a uma micro-escala, há a necessidade de utilizar outros sensores que tenham essa capacidade de detecção. No desenvolvimento das estruturas compósitas inteligentes, a fibra óptica surge num plano de relevo, quer pelas suas propriedades intrínsecas, quer pela facilidade de embebimento nos materiais.

Alguns autores, P. Fernidand *et al.* [255], têm apresentado junções de diferentes sensores ópticos, com o intuito de obterem sistemas de medição independentes da temperatura. A situação apresentada não está direccionada para o isolamento da temperatura, embora possa vir a ser realizada, mas sim no estudo da integridade do embebimento dos sensores envolvidos, em placas laminadas de reduzida espessura, para potenciais aplicações nos diferentes níveis de deformação, cobrindo assim uma gama superior na detecção.

O embebimento de um interferómetro permite obter uma estrutura mais sensível a fenómenos “mais dinâmicos” do que se consegue com o sensor de Bragg. No entanto, ao contrário deste, não dá um valor directo da medida e, por isso, necessita de uma conversão ou desmodulação do sinal obtido. Embora o interferómetro seja também usado para medições de deformação no plano, os custos envolvidos com os equipamentos necessários para a desmodulação do sinal são sempre um motivo para se usar sensores alternativos. Razão pela qual, ao incorporar estes dois sensores na mesma estrutura, cria-se a possibilidade de, em monitorizações futuras, poder-se ter sempre uma alternativa. Isto também só é possível dados os custos de produção das cavidades, tal qual são aqui apresentadas têm custos muito baixos, significativamente mais baixos do que as redes de Bragg.

### 8.4.2 – Concepção da placa

A placa compósita realizada possui quatro camadas de fibra de carbono unidireccional, pré-impregnado com resina de epóxico, as quais foram colocadas entre duas camadas de tecido “twill” 2/2 em fibra de carbono pré-impregnado com resina de epóxico.

Os sensores utilizados foram colocados entre as camadas do material unidireccional, e posicionadas tal como se apresenta na figura 8.31(a). As dimensões da placa, assim como a disposição dos sensores nesta são também apresentados na figura 8.31(b). A placa foi realizada por saco de vácuo em autoclave, tendo em atenção as alterações na metodologia de produção, considerações já anteriormente apresentadas no capítulo 6.

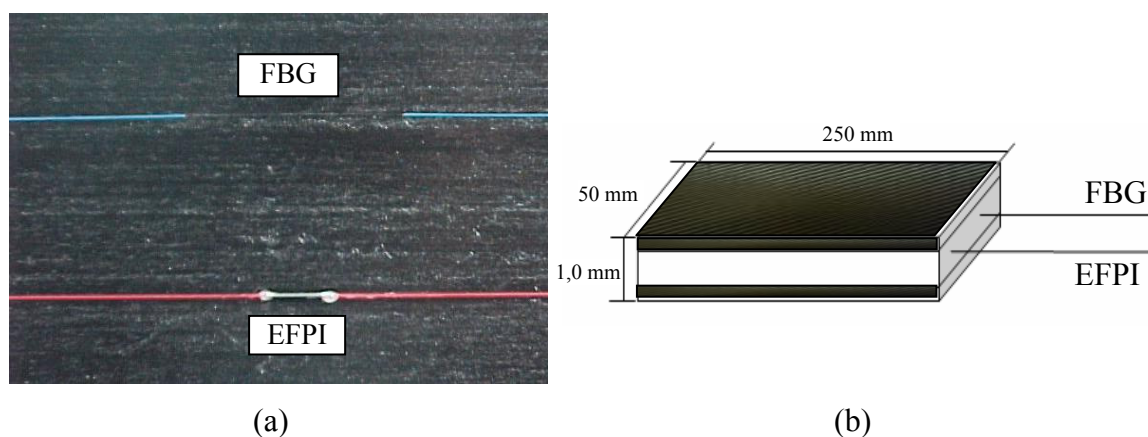


Figura 8.31 – (a) Colocação dos sensores entre as camadas do material compósito. (b) Posicionamento dos sensores e dimensões da placa realizada.

O sistema usado para a monitorização, em tempo real, do comportamento dos sensores, no caso do sensor de Bragg, foi o segundo set-up, apresentado no capítulo 5. Para a monitorização da cavidade interferométrica, foi usado um osciloscópio digital, Tektronix<sup>®</sup> TS200, controlado por um computador, com uma ligação GPIB, através do software LabView<sup>®</sup>. Na monitorização do extensómetro foi usado o Sipder8, da HBM<sup>®</sup>, ligado também a um computador.



### 8.4.3 - Comportamento dos sensores embebidos

Após a produção, foram realizadas verificações para a avaliação do estado de integridade do embebedimento dos sensores, cujos espectros em reflexão já foi apresentada no capítulo 6, figura 6.21.

Uma vez verificado o estado do embebedimento, foram realizados ensaios dinâmicos com flexão em quatro pontos. Dada a pequena espessura da placa, foi aplicada uma força de 50 N, distribuída pelos dois pontos de apoio, a uma frequência de 10 Hz. O deslocamento imposto à placa, e medido no seu centro, teve um valor máximo de 2 mm, medidos com um comparador. O ensaio teve uma duração de uma hora, dado que aparentemente, os resultados não demonstraram que algo particular tivesse ocorrido no decorrer daquele período de tempo.

Numa primeira visualização dos resultados podemos ver a forma da força aplicada, uma força alternada e, de igual forma, a deformação medida pela rede de Bragg, embebida na placa compósita, figura 8.32. O intervalo de tempo apresentado é de 1 segundo, por forma a facilitar a visualização dos resultados, mostrando claramente o conjunto de ciclos realizados naquela frequência, ajudando a sua comparação.

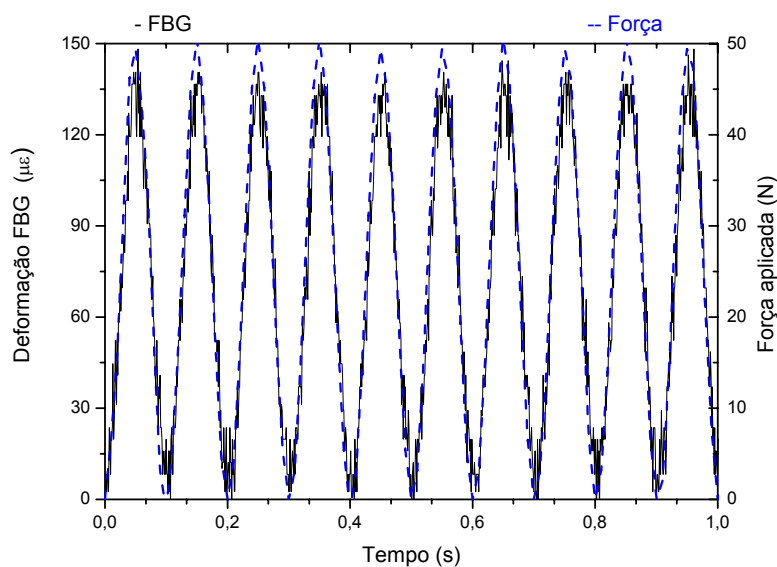


Figura 8.32 – Resposta do sensor FBG, à força aplicada.

Comparando os desempenhos dos sensores eléctrico e óptico, que se encontram separados por uma diferença de sensivelmente 400  $\mu\text{m}$ , podemos verificar como se comportaram no intervalo de tempo escolhido, e para a mesma força aplicada, figura 8.33. Observa-se a mesma tendência de comportamentos, embora o sensor de Bragg não chegue bem ao valor máximo atingido pelo sensor eléctrico. Situação que pode ser devida a dois factores distintos. Um deles, o facto da rede de Bragg não se apresentar com o pico perfeitamente definido, observado no capítulo 6 na figura 6.21(b), e que pode causar essa pequena perturbação, sendo que o outro pode estar relacionado com a distância entre ambos e, consequentemente, sentirem ligeiramente diferentes deformações, com o sensor óptico a realizar uma menor amplitude de movimento.

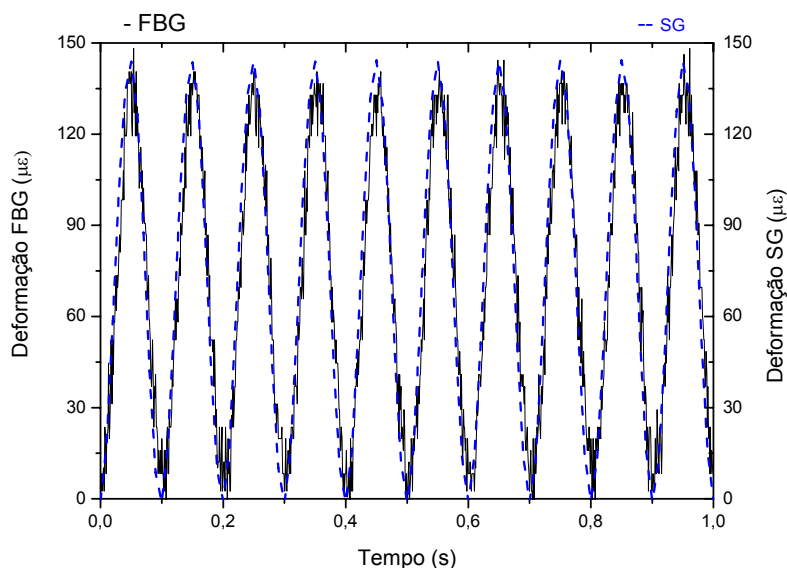


Figura 8.33 – Comparação entre os dois sensores, eléctrico e óptico embebidos

Observou-se que o sinal obtido pela cavidade interferométrica apresentou um menor ruído. No entanto, os valores apresentados são de tensão eléctrica, já que foram obtidos através do sinal do osciloscópio, surgindo assim em milivolt, figura 8.34.

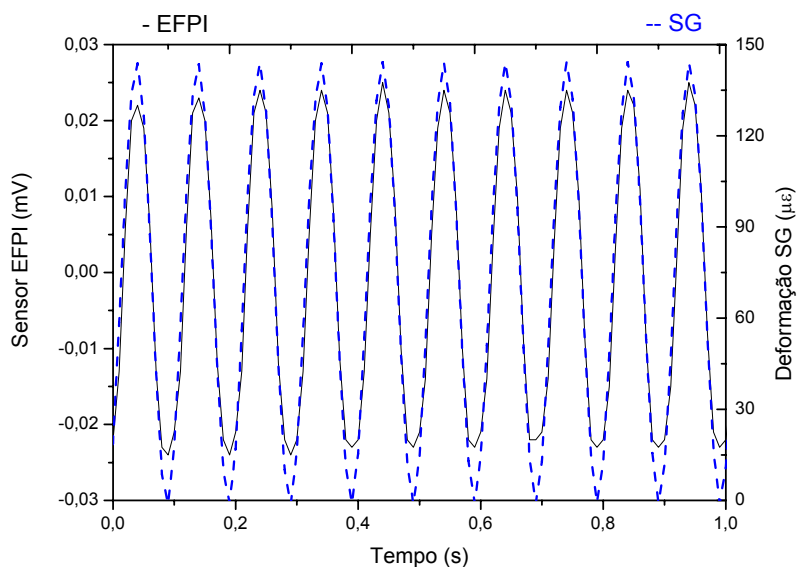


Figura 8.34 – Respostas obtidas pelos sensores, EFPI e SG.

Apesar das grandezas não serem comparáveis, em termos comportamentais o interferómetro apresenta um comportamento semelhante aos restantes sensores.

É também observada uma maior dificuldade por parte do sensor em acompanhar o comportamento do extensómetro eléctrico, principalmente na altura do ensaio em que a placa passa pelo ponto de deflexão nula. Este facto pode estar relacionado com a localização do sensor numa zona de linha neutra, ou seja a linha intermédia da espessura da placa.

#### 8.4.4 - Conclusão

Os dois sensores, demonstraram ter boas capacidades de adaptação ao embebimento, tendo em vista o objectivo global, que consiste em constituir estruturas compósitas inteligentes. Estes sensores mostraram serem óptimos candidatos à sua incorporação como parte de um sistema “nervoso” de monitorização em tempo real. Foi usada uma cavidade interferométrica de Fabry-Pérot (EFPI) e uma rede de Bragg em fibra óptica (FBG). Embora o embebimento deste segundo sensor esteja perfeitamente divulgado na literatura, ele ainda necessita de algumas optimizações, em função dos

diferentes materiais constantemente utilizados e, por isso, a constituição das estruturas compósitas é tão diversificada, mas também dada a presença de outros elementos nas suas proximidades. Por essa razão será sempre necessário efectuar uma calibração sempre que se alteram os procedimentos/materiais utilizados.

De uma forma global, os sensores demonstraram ter excelentes capacidades, em condições de actuação diferenciadas. Assim a rede de Bragg, é mais apropriada a uma actuação para medições dinâmicas de deformação, mas a baixas frequências. Enquanto que a cavidade interferométrica, mais dirigida a uma aplicação para deformações ocorridas a frequências elevadas, mais próximo do campo de actuação da emissão acústica.

# Capítulo 9

## 9 – Placa multisensora

### 9.1 – Introdução

As estruturas inteligentes nomeadamente de materiais compósitos laminados, nas quais são embebidos diferentes sensores, têm chamado recentemente à atenção em campos diferenciados para além da dita tradicional área da engenharia. O embebimento é um dos desafios colocados à engenharia dos materiais, sendo para tal necessário ultrapassar algumas das barreiras actualmente existentes, designadamente no que diz respeito ao conhecimento do comportamento destes, após o embebimento, e quando sujeitos a determinadas acções. Existem vários trabalhos nas áreas de simulação, de embebimento e em aplicações com diferentes sensores, e em particular com os piezoeléctricos [256-258], quer como elemento sensor mas também como actuador.

Neste sentido e tentando avançar um pouco mais no conhecimento, elaborou-se uma placa laminada, com dispositivos diferenciados a funcionarem como sensores. Apresenta-se neste capítulo um estudo que envolve para além da rede de Bragg em fibra óptica, dois outros tipos de sensores, um interferómetro extrínseco Fabry-Pérot de baixa *finesse* e um transdutor piezoeléctrico, obtendo-se assim uma placa multisensora.

Numa fase inicial do estudo foram realizados alguns testes preliminares, com um embebimento parcial e um outro na totalidade de elementos piezoelétricos, num compósito com reforço em fibra de carbono pré-impregnado com resina de epóxico. Consequentemente, foram realizados alguns ensaios, no sentido de observar o comportamento e a eficácia do embebimento.

De mesmo modo que no estudo realizado com as placas sensoras apresentadas nos capítulos anteriores, um extensómetro eléctrico foi colado à superfície desta placa. Esta foi submetida ao mesmo tipo de ensaios dinâmicos, anteriormente apresentados com as placas laminadas. Os sistemas de interrogação utilizados para os sensores foram já descritos em capítulos anteriores, nomeadamente no capítulo 5. Para o sensor de Bragg utilizou-se o quarto e último set-up. As respostas do extensómetro, do piezoelétrico, assim como dos transdutores de carga foram adquiridas através do sistema de aquisição Spider8 da HBM®. O sinal do interferómetro foi digitalizado através de um osciloscópio da série Tektronix TS200 controlado pelo software LabVIEW™ e transferido por uma interface GPIB (IEEE488.2) para um computador.

## 9.2 – Embebimento do elemento piezoelétrico

No estudo do embebimento do piezoelétrico, PZT, quer parcialmente quer total, foi usado um piezoelétrico em material cerâmico, com as dimensões de  $12 \times 12 \times 0,3 \text{ mm}^3$ . A escolha particular deste piezoelétrico prendeu-se, essencialmente, com as suas reduzidas dimensões, e pelo facto de, potencialmente, ter grande sensibilidade às forças envolvidas entre as camadas do material compósito.

Na figura 9.1 pode-se observar a colocação dos eléctrodos de contacto numa face do piezoelétrico, figura 9.1(b), A figura 9.1(c) mostra o embebimento parcial, nesta situação foi usada uma única camada de pré-impregnado de fibra de carbono com resina de epóxico. No embebimento total, figura 9.1(d), colocou-se o piezoelétrico, entre duas

camadas do material pré-impregnado. Tal como em situações de embebimento anteriores, utilizou-se pré-impregnado de fibra de carbono/epóxico com um entrelaçamento do tecido em “twill” 2/2. Nesta etapa inicial verificou-se a resposta do elemento piezoelétrico após estes tipos de embebimento, com recurso a um multímetro digital, figura 9.2. Observou-se que em termos qualitativos, o embebimento tinha decorrido de forma eficaz e apresentando bons resultados, nomeadamente com medições à resistência e à capacidade do elemento.

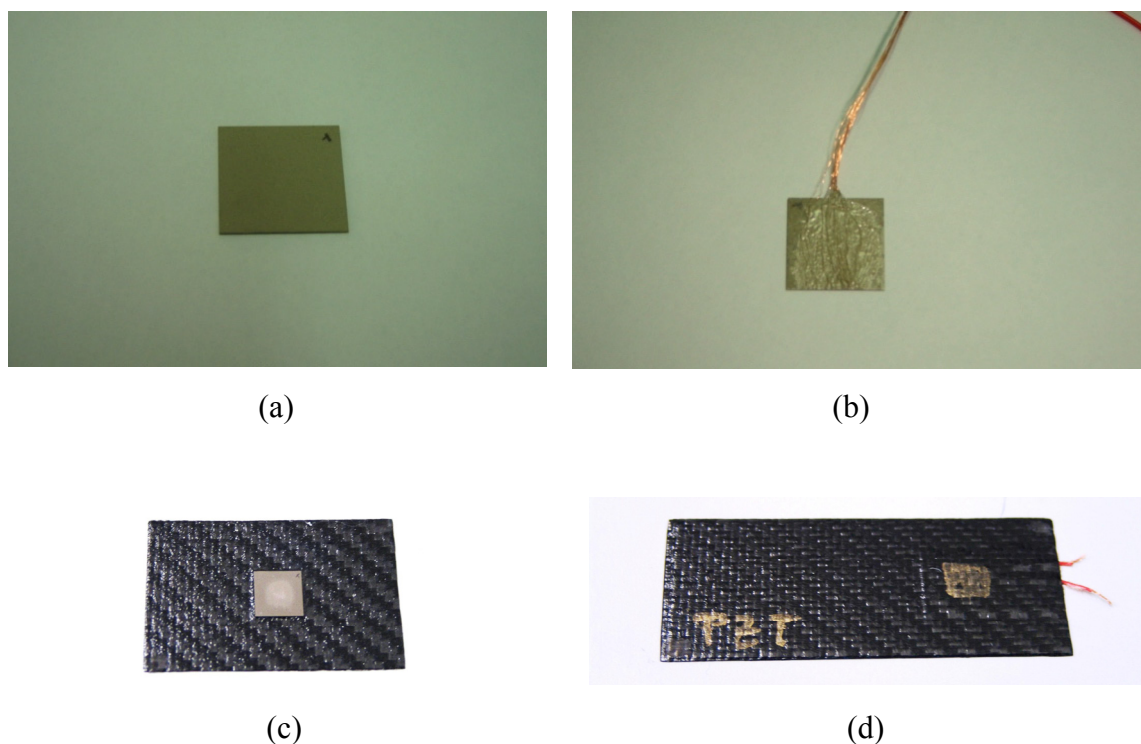


Figura 9.1 – (a) Aspecto do piezoelétrico. (b) Colocação de contactos eléctricos nas faces do piezoelétrico. (c) Piezoelétrico embebido numa das faces do compósito. (d) Placa de material compósito com um piezoelétrico embebido.

O processo de embebimento teve como principal cuidado e também de dificuldade o isolamento dos eléctrodos de contacto colocados e a sua resistência ao processo de produção da placa em material compósito, dada a possibilidade de estes deixarem o contacto com a superfície do piezoelétrico. Tal situação nunca viria a ocorrer nos ensaios realizados. Pôde-se verificar isso mesmo dado que não demonstraram qualquer falha na comunicação com o elemento, sendo assim possível verificar o seu funcionamento. O que foi verificado quando, ao menor movimento

provocado à placa, o piezoelétrico respondeu com uma variação da tensão eléctrica, entre as duas faces, senso positiva ou negativa conforme o deslocamento provocado.

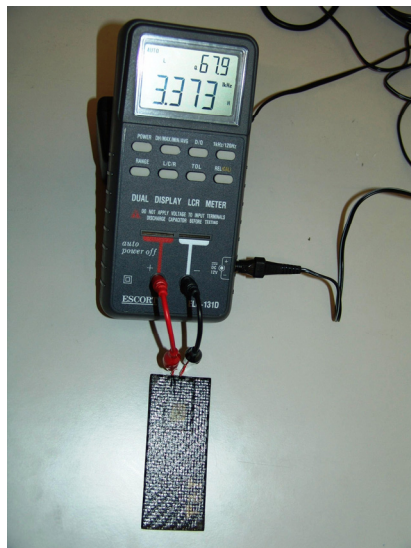


Figura 9.2 – Montagem inicial para verificação da resposta do piezoelétrico.

Foi também possível verificar a potencial capacidade do piezoelétrico em gerar e transmitir vibrações quando embebido no material compósito. Para tal, foram realizadas observações às deformações da placa compósita por interferometria de *speckle* (ESPI - *Electronic Speckle Pattern Interferometry*), quando foram aplicadas tensões eléctricas no Piezoelétrico.

### 9.2.1 – Interferometria de *speckle*

As técnicas interferométricas usualmente utilizadas em mecânica experimental têm como principais virtudes o fato de serem não destrutivas e de não terem contacto com o objecto em análise, isto é, a única interacção física entre a amostra a ser medida e o sistema de medição dá-se através de um feixe luminoso. Além de possuírem elevada sensibilidade, quando comparadas com os processos mecânicos convencionais, de análise de deformações, por exemplo. A sensibilidade é outra vantagem, pois, dependendo das configurações utilizadas, é possível realizar medidas desses parâmetros desde centésimos até centenas de micrones.



Esta técnica, interferometria de *speckle*, envolve o registo do padrão de *speckle* obtido por interferência entre o campo de *speckle*, resultante da imagem do objecto quando iluminado por uma fonte de luz coerente, e um campo de referência uniforme [259,260]. As franjas obtidas são devidas a variações locais do grau de correlação entre os dois padrões de *speckle*.

Este sistema de medida envolve a utilização de um interferómetro, de uma fonte de radiação coerente (um laser) e um sistema de aquisição e processamento de imagem. Os padrões interferométricos obtidos com o sistema são gravados por um detector de vídeo. Dadas as características dos detectores CCD este é, actualmente, o meio de gravação mais utilizado. O sinal electrónico obtido é enviado para um sistema digital de tratamento de imagem. Os interferogramas são normalmente mostrados em tempo-real num monitor integrado no sistema.

O sistema de ESPI pode ser descrito como sendo uma montagem holográfica, na qual a emulsão fotográfica é substituída por um meio de registo electrónico. O uso de vídeo é muito agradável, pois permite observar as franjas de correlação em tempo real, tornando a técnica adaptada a aplicações em que seja necessário ajustar parâmetros e rapidamente observar o efeito desses ajustamentos. Os sistemas de vídeo têm sido usados com interferómetros de *speckle* para a análise em tempo real de vibrações mecânicas usando técnicas de tempo médio (*time average*), deslocamento de estruturas ou análise de deformações usando a subtração em tempo real. Métodos interferométricos de *speckle* baseados em vídeo, tais como o ESPI, permitem a medição de todo o campo de deformações da superfície de objectos difusos.

Os resultados dos deslocamentos experimentais, com embebimento parcial ou total, resultaram da análise das franjas obtidas. Sabendo que a separação entre franjas corresponde a um deslocamento de  $\lambda/2$ , em que  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser, pode assim calcular-se, o deslocamento sofrido pela superfície da placa. Assim, para um determinado ponto da superfície da placa, na zona do piezoeléctrico, o deslocamento sofrido poderá ser obtido usando a expressão:

$$D = N \times (\lambda/2) \quad (9.1)$$

em que  $D$  é o deslocamento registado,  $N$  é o número de franjas observadas, e  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser usado, sendo neste caso de 632 nm.

### 9.2.2 – Resultados do ESPI

A placa com embebimento parcial do piezoeléctrico denota uma maior sensibilidade à aplicação da tensão eléctrica, enquanto que a que possui o piezoeléctrico completamente embebido apresenta uma maior dificuldade ao deslocamento, necessitando de valores de tensão eléctrica bastante mais elevados.

Na figura 9.3, apresentam-se as imagens obtidas da deslocação da placa com embebimento parcial, após a aplicação de uma tensão eléctrica ao piezoeléctrico. Dado que a placa apresenta uma espessura de 200  $\mu\text{m}$ , sendo bastante maleável, o que se traduz pela deslocação observada, mesmo a baixos valores da tensão eléctrica aplicada.

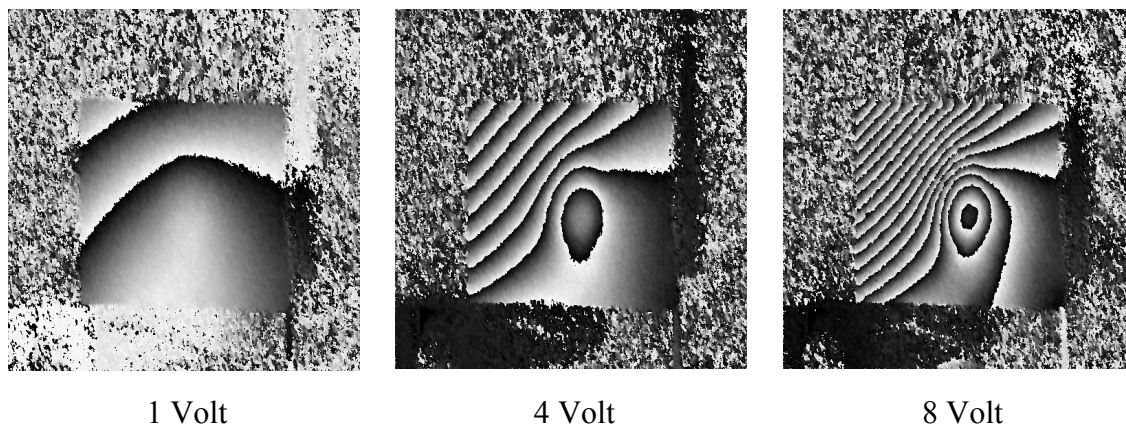


Figura 9.3 – Deslocações da placa com embebimento parcial do piezoeléctrico, em função da tensão eléctrica aplicada.

No registo dessa variação da deformação na zona do elemento piezoeléctrico com a tensão eléctrica aplicada, figura 9.4, pode-se observar um comportamento linear do conjunto formado pela placa e pelo piezoeléctrico.

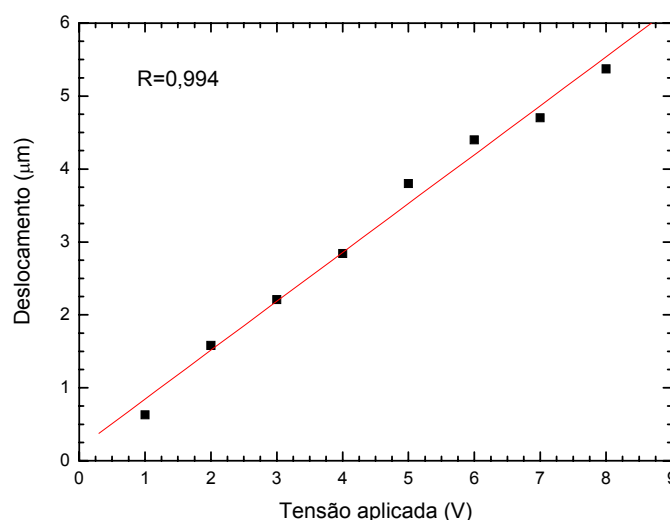


Figura 9.4 – Deslocação da placa em função da tensão eléctrica aplicada no caso do embebimento parcial.

À placa apresentada na figura 9.1(d), foram aplicadas tensões eléctricas de forma a verificar o comportamento do piezoeléctrico, quando embebido na sua totalidade. As tensões eléctricas aplicadas neste caso são efectivamente maiores, dada a menor mobilidade da placa, dado que esta também apresenta uma espessura de 400 μm, na zona afastada do piezoeléctrico, o elemento actuador, está completamente subjugado às limitações de movimentação por parte do material compósito. A figura 9.5, mostra as deslocações geradas na placa quando se aplicaram valores de tensão eléctrica na ordem das dezenas de volts.

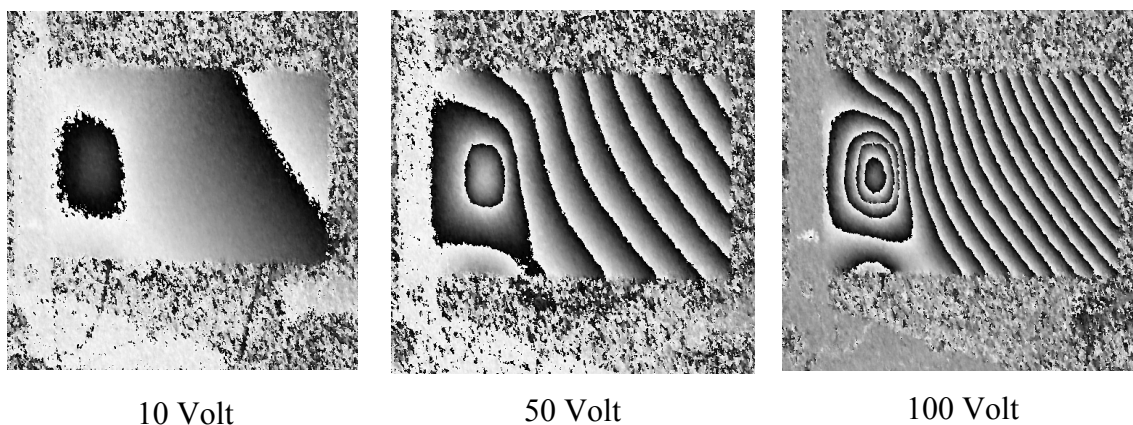


Figura 9.5 – Deslocações da placa com embebimento total do piezoeléctrico, em função da tensão eléctrica aplicada.

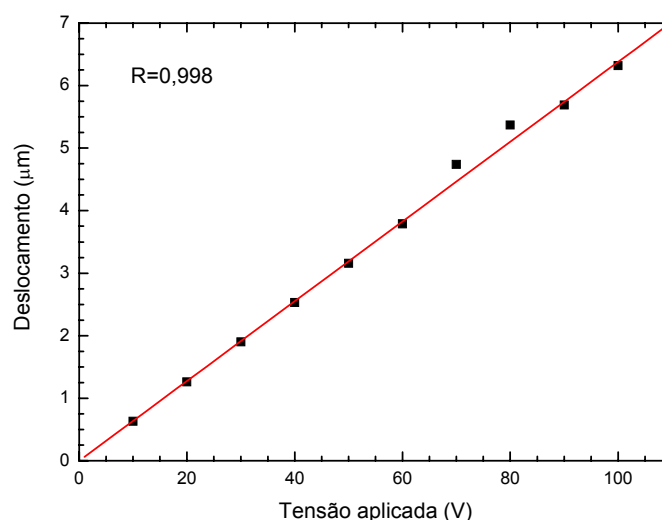


Figura 9.6 – Comportamento linear do conjunto, em função da tensão aplicada.

Embebimento total.

O comportamento do conjunto, com o piezoelétrico totalmente embebido, foi, também ele, linear para a gama de valores observados, figura 9.6.

Verifica-se que a razão entre a deslocamento atingido pelo conjunto e a tensão eléctrica aplicada, na situação de embebimento parcial, é de  $0,67 \mu\text{m/V}$ , enquanto que no segundo caso esse valor é de  $0,064 \mu\text{m/V}$ .

Os comportamentos verificados anteriormente deram alento ao processo seguinte. Embora se tratem de situações diferentes, assim, pretendeu-se verificar o comportamento do piezoelétrico e efectuar uma possível comparação com os restantes sensores embebidos no material compósito. Como elemento sensor, também se comparou com um extensómetro, e numa fase posterior, embora esta fase, ficará para desenvolvimento em trabalho futuro, como possível actuador.

### 9.3 – Embebimento do PZT e dos sensores ópticos

A placa multisensora foi produzida com o embebimento de três tipos de sensores, dois sensores ópticos, uma rede de Bragg, e uma cavidade interferométrica extrínseca de Fabry-Perot, de baixa *finesse* e um piezoelétrico. A placa apresentou-se com as seguintes dimensões no final da produção,  $250 \times 50 \times 1,0 \text{ mm}^3$ . No sentido de salvaguardar o bom funcionamento da cavidade interferométrica essencialmente, o material usado para estar em contacto com os sensores foi o pré-impregnado unidireccional de fibra de carbono/epóxico. Tanto mais que havia necessidade de aumentar o volume de material para poder acomodar mais correctamente possível o piezoelétrico. Além disso o diâmetro do tubo capilar usado na construção da cavidade apresentava um diâmetro de aproximadamente  $450 \text{ }\mu\text{m}$ . Há, no entanto, a possibilidade de se conseguir no mercado tubos capilares de diâmetro exterior mais pequeno pelo que futuramente será possível reduzir esta camada de material compósito onde são colocados os sensores. A figura 9.7 mostra o esquema de empilhamento usado, assim como o posicionamento dos sensores na placa. A distância do centro dos sensores ópticos ao extremo da placa é  $60 \text{ mm}$ , precisamente a mesma distância que separa o centro do piezoelétrico do extremo da placa, embora posicionada no lado oposto. A placa foi realizada em autoclave.

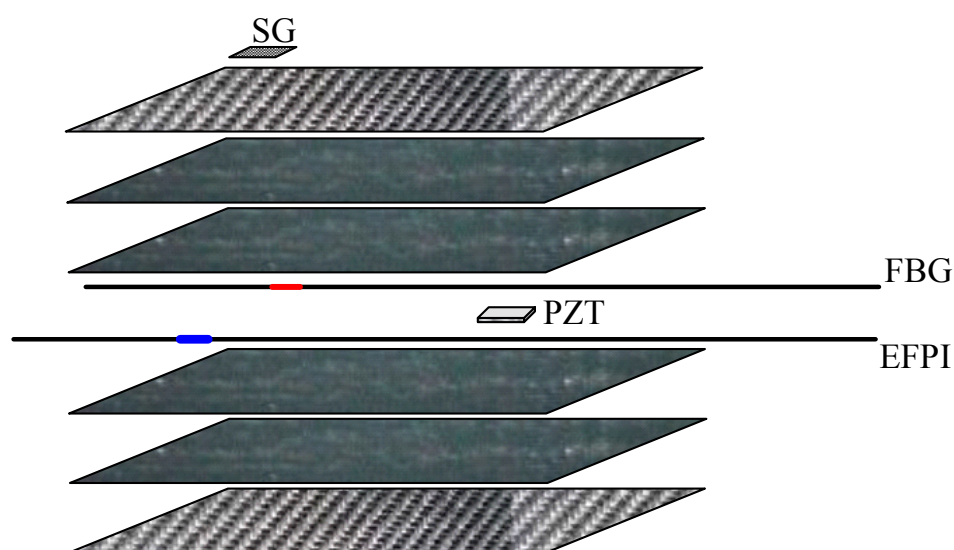


Figura 9.7 – Empilhamento da placa multisensora, com o posicionamento dos sensores.

Aproveitando o facto da fibra de carbono ser um bom condutor, foi colocado apenas um eléctrodo de contacto numa das faces do piezoeléctrico. Assim, e tal como anteriormente se tinha realizado no embebimento parcial, uma das faces foi colocada directamente em contacto com o tecido em fibra de carbono, possibilitando efectuar a ligação do segundo terminal em qualquer posição da placa de teste. A figura 9.8 mostra os materiais colocados junto do piezoeléctrico.

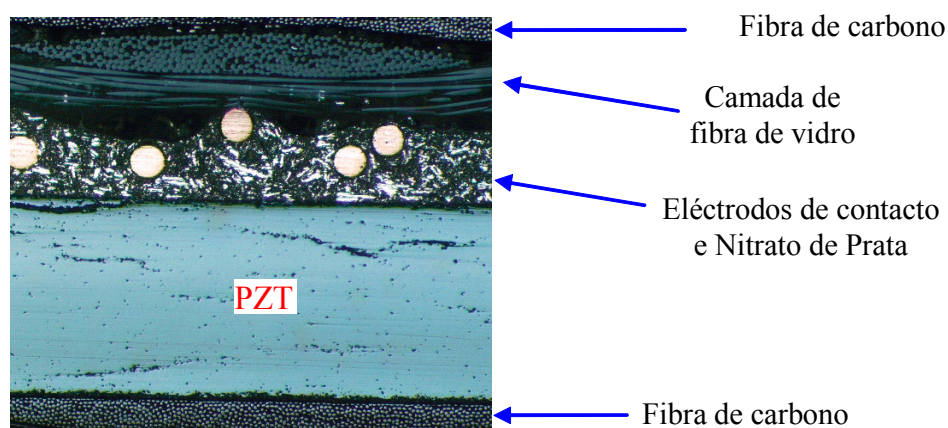


Figura 9.8 – Corte da placa multisensora na zona do piezoeléctrico.

No entanto, com este procedimento é necessário efectuar o isolamento da superfície onde se efectuou a colocação dos eléctrodos de contacto ao piezoeléctrico. Para isso, recorreu-se a tecido em tafetá de fibra de vidro pré-impregnada com resina de epóxido, já anteriormente utilizada na elaboração de placas laminadas. As dimensões deste tecido são de forma a garantirem o isolamento dos eléctrodos do contacto com o material compósito.

Na figura 9.9, pode-se observar o bom embebimento conseguido com os sensores ópticos.



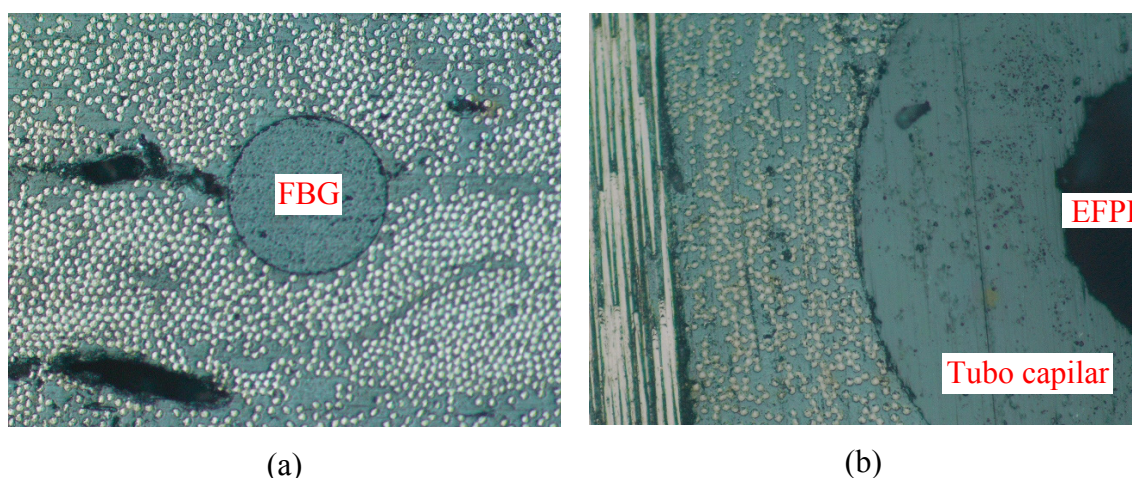


Figura 9.9 – Embebimento dos sensores ópticos (a) FBG e (b) EFPI.

## 9.4 – Comportamento de placa multisensora

A placa uma vez realizada foi submetida a ensaios de flexão em quatro pontos, com recurso ao set-up já anteriormente utilizado. Desta forma, foi possível registar os valores para a força exercida pela placa nos suportes, ou transdutores de carga, assim como registar a deformação que a mesma sofreu com recurso ao extensómetro colocado na zona dos sensores ópticos, à superfície. Do interior da mesma foi, possível obter resultados do interferómetro, da rede de Bragg e do piezoeléctrico. Todos estes sensores responderam correctamente às solicitações impostas, à frequência de 10 Hz, tal como tinha acontecido anteriormente com as placas laminadas.

O deslocamento máximo imposto ao centro da placa é de 2 mm, efectuado com a ajuda de um comparador. O facto de se ter colocado os sensores ópticos à mesma distância do extremo da placa que o piezoeléctrico, permite assumir que o campo das tensões em que os sensores estão envolvidos é o mesmo quando há movimentação desta com a força imposta na flexão.

A forma da força aplicada à placa é representada na figura 9.10, na qual é também possível verificar qual o valor quantitativo que esta atingiu. Pode-se também observar qual a deformação que foi imposta na superfície da placa, devido à solicitação.

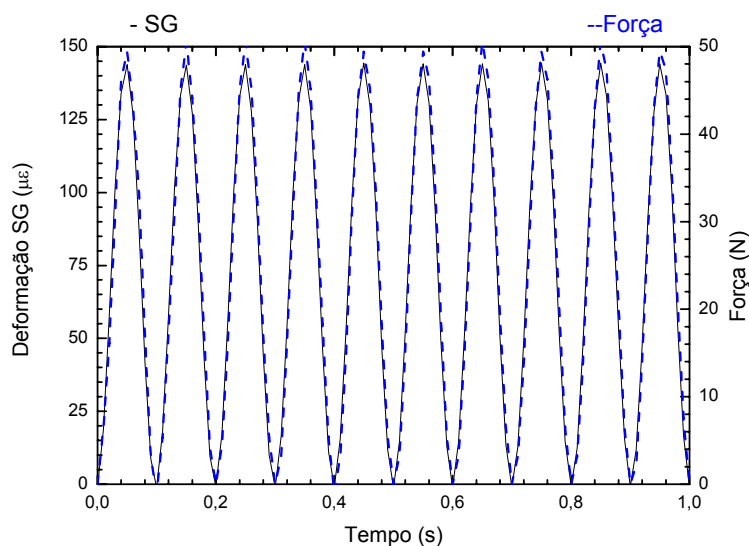


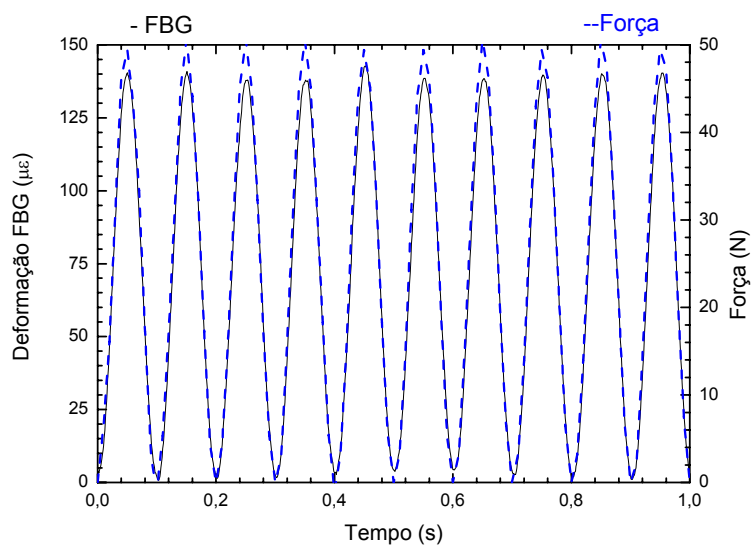
Figura 9.10 – Forma da força aplicada à placa multisensora, e a deformação atingida na superfície junto dos sensores ópticos.

É possível observar que a deformação e a força aplicada apresentam-se com o mesmo comportamento, permitindo dessa forma dizer que a placa se apresenta com boas condições de produção, e que os sensores apesar de poderem ser considerados um corpo estranho para o material anfitrião não interferem no comportamento desta, denotando não introduzir qualquer deformação durante a aplicação da força.

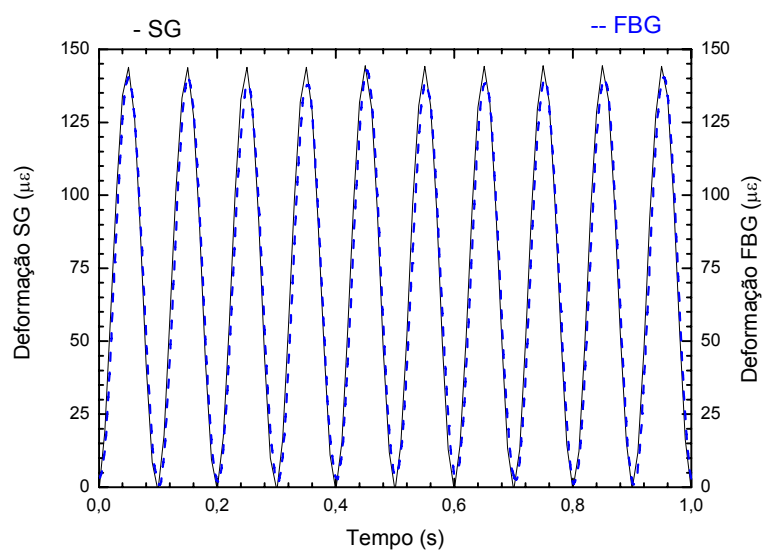
Por observação do comportamento dos vários sensores envolvidos é possível verificar as deformações atingidas no interior do material, numa zona mais próxima dos pontos de apoio, aonde se encontram localizados os sensores. O seu posicionamento permite garantir que, havendo uma distribuição uniforme do campo de tensões durante a aplicação da força, os sensores estarão sujeitos às mesmas deformações.

A figura 9.11(a), mostra o comportamento da rede de Bragg em relação à força aplicada, bem como a comparação com as deformações atingidas pelo extensómetro, figura 9.11(b).





(a)



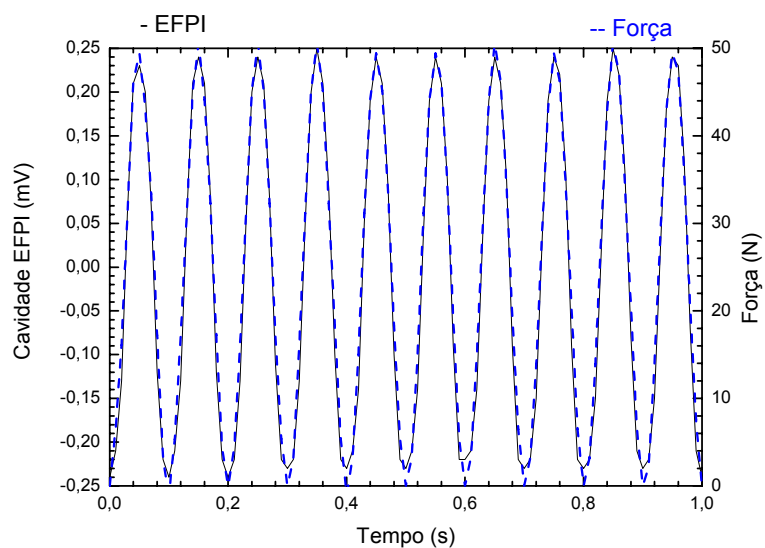
(b)

Figura 9.11 – (a) Relação entre a força aplicada e a deformação obtida pelo FBG.

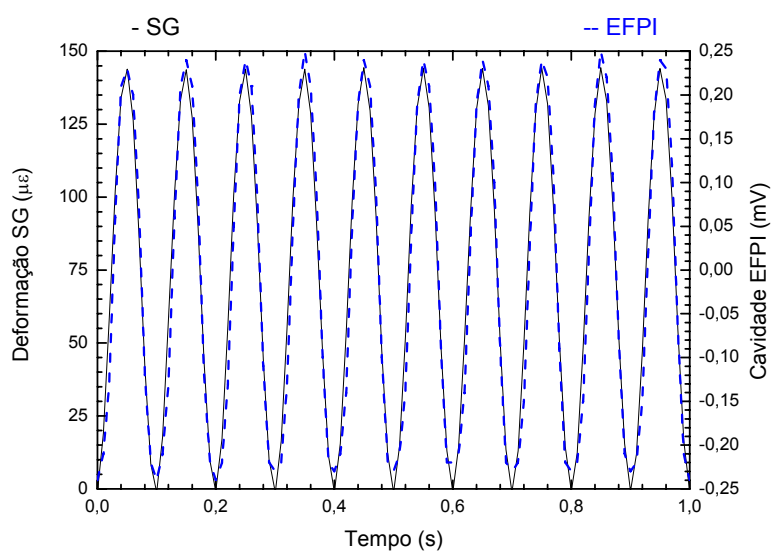
(b) Comparação entre as deformações obtidas pelos sensores SG e FBG.

Pode-se observar que existe, de facto, uma pequena diferença entre os valores das deformações registadas pelos sensores. A diferença de valores poderá ser atribuída à separação entre estes, que é sensivelmente 0,5 mm, com a diferença em deformação a situar-se entre os 5  $\mu\text{m}$  e os 7,5  $\mu\text{m}$ .

Na figura 9.12, apresenta-se a comparação entre o comportamento da cavidade interferométrica, com a força aplicada e com o extensômetro.



(a)



(b)

Figura 9.12 – (a) Relação entre a força aplicada e a resposta do sensor EFPI. (b) Comparação com a resposta do SG.

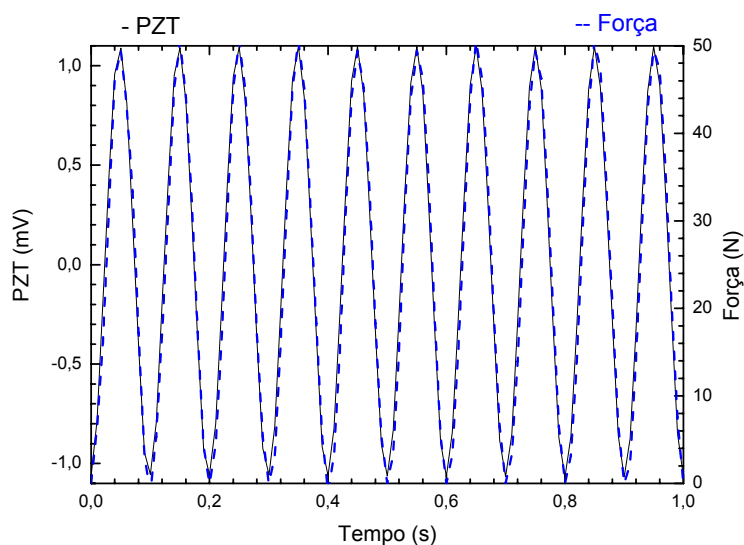
Dado o sistema de interrogação da cavidade não estar completamente operacional, uma vez que não foi possível recuperar os sinais provenientes de um dos fotodetectores, não foi possível quantificar, em termos de deformação o valor obtido pela cavidade.

Desta forma, apenas se comprova o comportamento desta em relação à forma da força aplicada. E, posteriormente, em função dos comportamentos semelhantes que se obtiveram inferir qual a deformação sofrida pela cavidade.

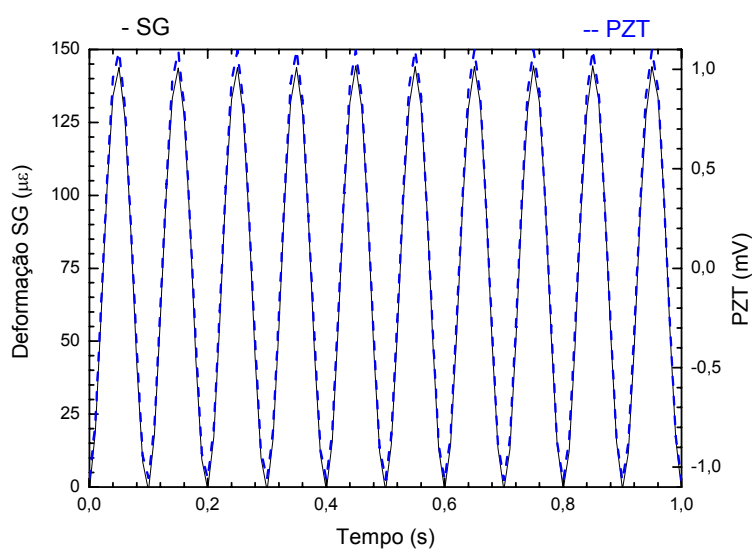
Salienta-se que para os menores valores da deformação registada pelo extensómetro, a que corresponderá a situação em que a placa passa pelo ponto de menor flexão, a forma dos valores registados pela cavidade não se aproxima do valor da deformação registada pelo extensómetro. Existe, tal como se evidenciou com o sensor em rede de Bragg, uma separação entre os sensores de sensivelmente 350  $\mu\text{m}$ , razão que se considera como um dos motivos das diferenças encontradas. Sendo que o extensómetro, pelo facto de ter um maior deslocamento uma vez que está colocado na face da placa inferior, pode obter uma maior deformação, dado que regista a maior amplitude do movimento entre os sensores usados.

O comportamento do piezoeléctrico em relação à força aplicada é apresentado na figura 9.13, fazendo uma comparação entre o comportamento deste e os valores da deformação do extensómetro eléctrico. Mais uma vez se observa que os comportamentos são semelhantes, quer em relação à força aplicada, quer em relação à deformação registada pelo extensómetro. Tal permite, também, inferir qual a força envolvida na flexão da placa que leva ao piezoeléctrico a atingir aquela variação na tensão eléctrica, entre as superfícies. De igual forma, será também possível inferir a deformação média atingida pelo centro do piezoeléctrico, em relação à deformação registada pelo extensómetro.

Os valores registados por este piezoeléctrico, não se podem comparar quantitativamente com os valores obtidos com o piezoeléctrico que foi embebido entre duas camadas de material compósito, figura 9.1(d), dada as diferenças entre as liberdades de movimento que uma e outra placa permitem. Todavia considerações similares poderão ser tomadas, levando a uma possível “calibração” de cada um deles, dada a diferença de estruturas compósitas laminadas que estão envolvidas.



(a)



(b)

Figura 9.13 – (a) Comparação entre os valores do PZT e a força aplicada.

(b) Comparação entre os valores do PZT e o SG.

Ao comparar estes valores é possível observar que as diferenças entre os valores máximos atingidos é também menor do que anteriormente se tinha verificado com os sensores ópticos. A diferença mínima entre as linhas de posicionamento dos sensores é agora de 350  $\mu\text{m}$ , o que posiciona o piezoelétrico mais próximo das deformações mínimas atingidas pelo extensómetro sendo a distância do plano horizontal entre ambos também menor.

Como um dos objectivos deste trabalho, e para a frequência dos ensaios realizada, pode-se observar em função da comparação dos comportamentos entre os sensores embebidos no material compósito, figura 9.14, o bom comportamento destes quando embebidos no compósito laminado, considerando a heterogeneidade de formas e dos materiais dos sensores envolvidos obtendo, no entanto, por parte destes, o mesmo tipo de forma de resposta à solicitação imposta.

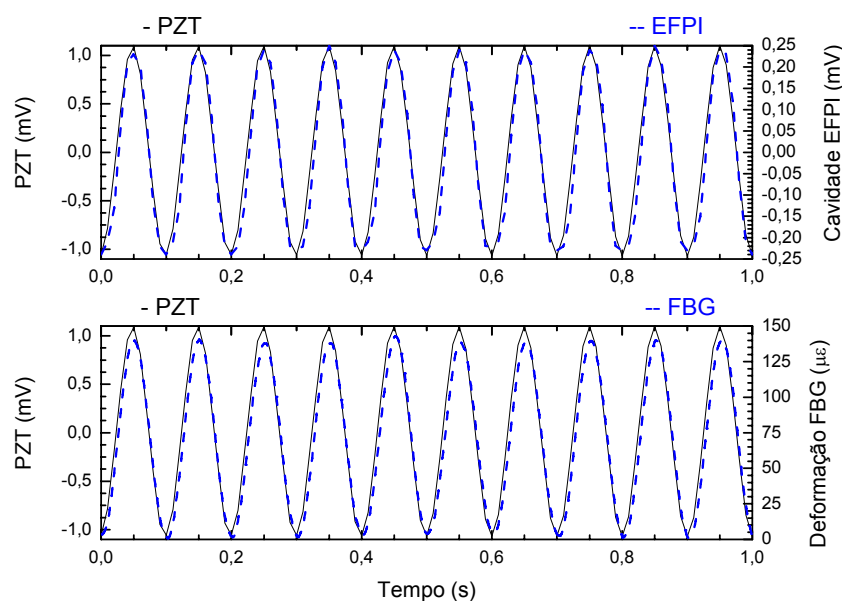


Figura 9.14 – Comparação entre os comportamentos registados pelo PZT com o EFPI, e com o FBG.

#### 9.4.1 – A frequências superiores

A placa multisensora foi ainda sujeita a solicitações com frequências superiores aos 10 Hz. Por conseguinte, houve necessidade de alterar ligeiramente o set-up, passando este a uma flexão em três pontos. Sendo que os dois pontos de apoio continuaram a ser os transdutores de carga, e o ponto superior localizado no centro da placa a imprimir flexão a esta. A amplitude máxima imposta no centro da placa foi de 2 mm, tal como anteriormente. Os sistemas de interrogação e aquisição de dados mantiveram-se os mesmos. A taxa de aquisição passou para 1 kHz.

Após a implementação do set-up, foi possível observar o comportamento da placa quando sujeita a uma frequência de 40 Hz, pelos diferentes sensores. Na figura 9.15, apresenta-se a comparação dos comportamentos registados entre o extensómetro, e os restantes sensores.

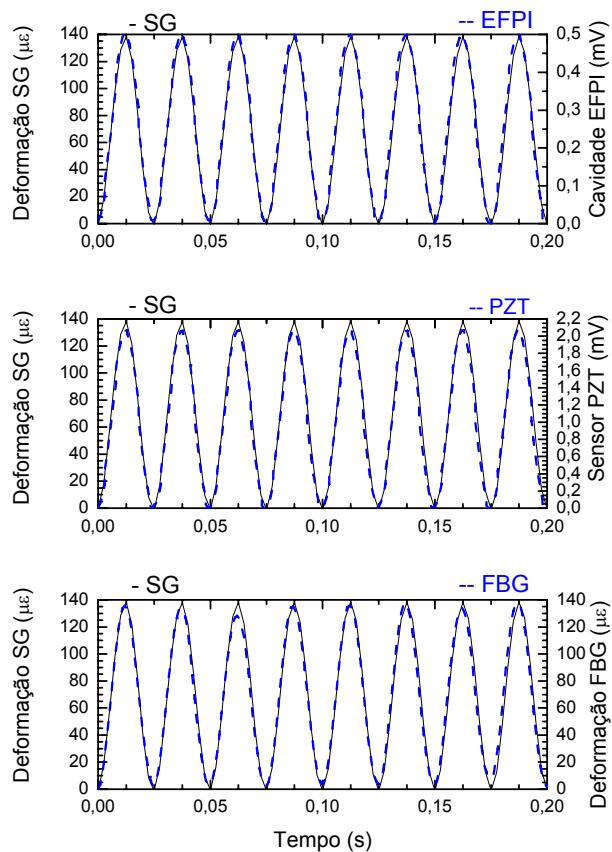


Figura 9.15 – Comparação entre os sensores FBG, PZT e EFPI à frequência de 40 Hz.

A esta frequência é possível observar que os restantes sensores acompanham a forma da deformação registada pelo extensómetro. Nota-se, no entanto, próximo dos valores extremos, que começam a existir pequenas flutuações, no registo dos valores dos sensores, situação que não foi completamente explorada, mas que poderá resultar dos sistemas de aquisição, quando do registo dos dados.

As diferenças entre os valores extremos dos sensores começam a realçar com o aumento de frequência imposta à placa, se bem que de uma forma progressiva. Esta situação é confirmada na figura 9.16, com o registo dos comportamentos dos sensores a 70 Hz.

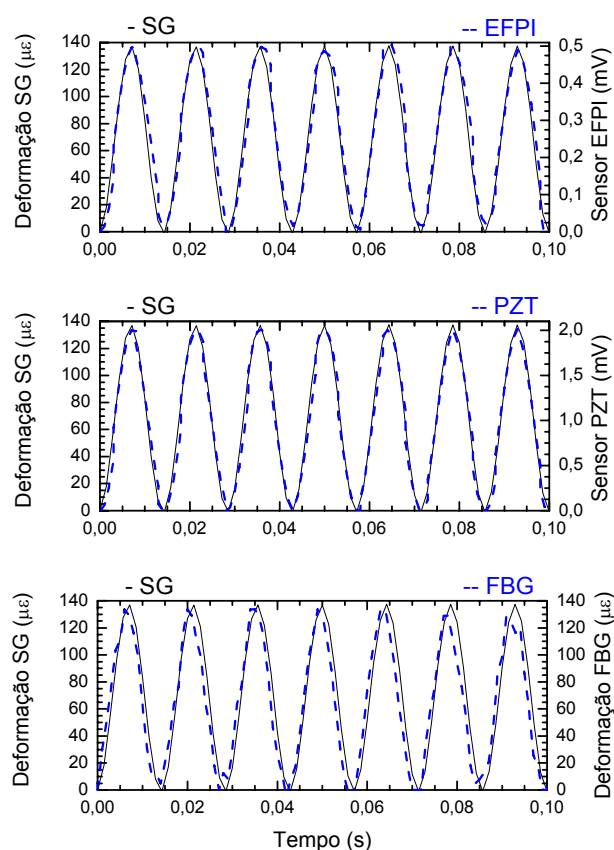


Figura 9.16 – Comparação entre os sensores FBG, PZT e EFPI à frequência de 70 Hz.

É cada vez mais evidente que o sistema de aquisição associado à interrogação da rede de Bragg, não está a acompanhar completamente as variações a que o sensor óptico está sujeito, embora ainda mostre completamente a forma da força imposta. No entanto, os restantes sensores apresentam-se com comportamentos semelhantes.

Apesar de se verificar, para aqueles intervalos de tempo, alguma discrepância no comportamento dos sensores, no entanto, se essa observação fosse realizada ao conjunto de dados obtidos para cada um deles, de facto, essas pequenas diferenças não seriam perceptíveis, já que a placa mantém o mesmo comportamento sem alterações visíveis. Ou seja, conseguem-se com facilidade estabelecer duas linhas paralelas a limitar os valores dos máximos e dos mínimos alcançados, situação que mostra o bom comportamento de integração no material compósito conseguida pelos sensores embebidos.

Elevando mais a frequência, desta feita para os 100 Hz, os sensores continuam a apresentar um comportamento interessante, para os valores vistos globalmente, dado que continuam a atingir valores máximos muito próximos dos valores até então obtidos. No entanto, nota-se uma pequena diminuição, embora ligeira, e que se pode dever ao facto do set-up, não estar preparado para as frequências empregues. Sempre que se alterou a frequência o sistema teve de ser ajustado, dado que a placa tem a tendência de provocar uma ligeira folga no set-up, originado uma ligeira batida da placa. Nessas alturas foi necessário parar os ensaios e fazer os respectivos ajustes. Na figura 9.17, pode-se ver a forma como os sensores responderam à solicitação imposta.

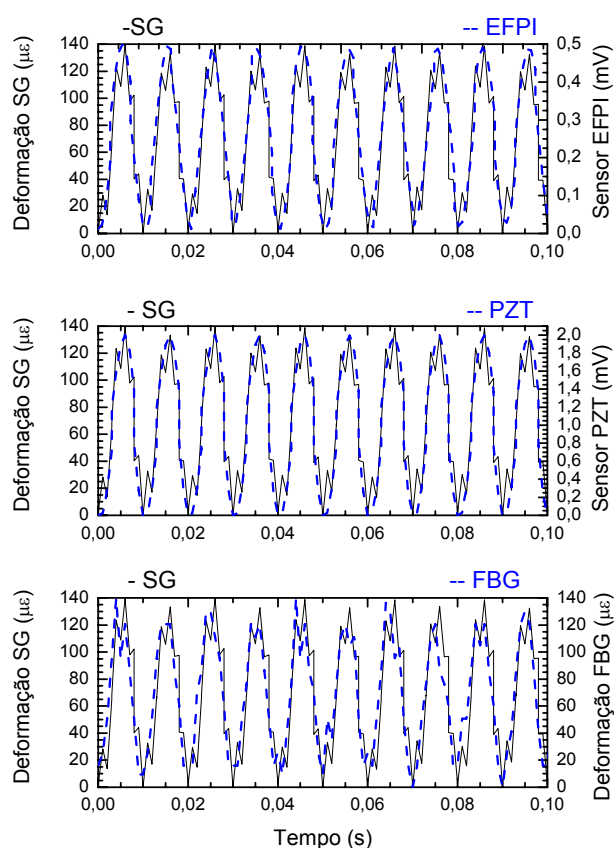


Figura 9.17 – Comparação entre os sensores FBG, PZT e EFPI à frequência de 100 Hz.

Quando se analisam os valores obtidos para intervalos de tempo mais reduzidos, podemos observar que alguns dos sensores apresentam comportamentos menos eficientes, situação que se pode dever aos sistemas de interrogação não estarem a acompanhar as frequências que se começam a praticar, além de eles próprios não serem eficientes para estas frequências mais elevadas. Embora o piezoeléctrico e o



interferómetro estejam a mostrar um bom comportamento mesmo a 100 Hz. Refira-se que o objectivo não era, de facto, verificar qual o mais eficiente, mas sim se com um aumento de frequência de oscilação, os sensores envolvidos no embebimento ainda respondiam, e se o faziam correctamente. Desta forma, se tivermos uma estrutura na qual estejam embebidos este tipo de sensores, e se esta sofrer uma alteração de baixa frequência, por uma qualquer situação, como seja, uma batida provocada por um qualquer objecto, a alteração poderá ser observada através do comportamento dos sensores.

Dado o comportamento do extensómetro e da rede de Bragg, não estarem a acompanhar a subida de frequência correctamente, deixou-se de registar estes sensores. No entanto, realizou-se uma pequena avaliação qualitativa do comportamento do piezoeléctrico para frequências superiores, figura 9.18. A cavidade também não foi usada, por dificuldades de comunicação com o sistema de aquisição. Embora esta tenha capacidade de acompanhar as subidas de frequência.

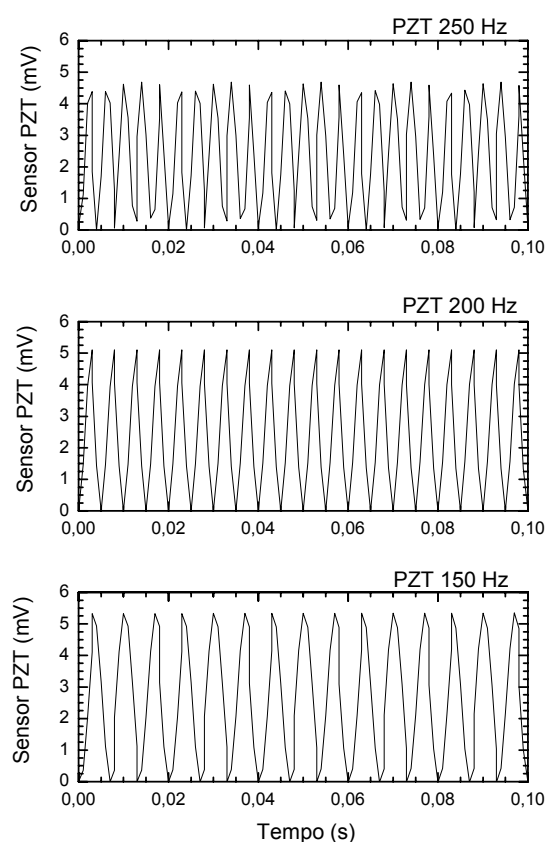


Figura 9.18 – Comportamento do PZT para as frequências de 150 Hz, 200 Hz e 250 Hz.

A placa foi solicitada até atingir a frequência de 250 Hz, sem observar-se grandes alterações visíveis aos valores atingidos pelo sensor. No entanto, para estes valores foi com alguma dificuldade que se manteve a placa posicionada e a vibrar com a amplitude inicial. Outra limitação que começou a notar-se significativamente deveu-se ao sistema de aquisição usado, com uma limitação na taxa de aquisição da ordem dos 1200 Hz, o que dá uma margem muito curta para adquirir os sinais do sensor, tornando-se obvio pela irregularidade da aquisição a 250 Hz. Assim, e apesar dos sistemas de aquisição não acompanharem na totalidade a evolução nas frequências, é convicção, que estes sensores poderiam obter valores a frequências superiores, quando embebidos no material compósito.

No fim destes ensaios, foi realizada uma observação ao espectro em reflexão da rede de Bragg, no sentido de verificar se, com os ensaios em frequência, este sofreu alguma alteração perceptível. A figura 9.19 mostra o espectro obtido.

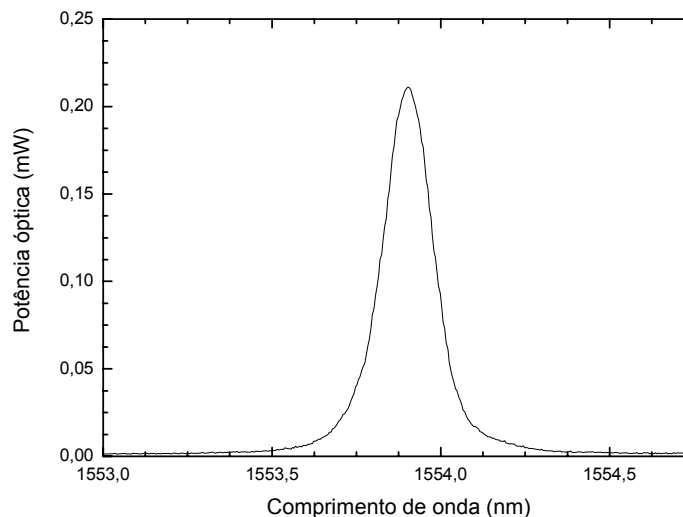


Figura 9.19 – Espectro em reflexão da rede de Bragg, após os ensaios em frequência.

Dada a forma do espectro é possível induzir um bom embebimento do sensor, dado que não são notórias alterações à forma que o espectro apresenta no fim dos ensaios, em relação à forma inicial antes de toda a série de ensaios. Demonstra-se, desta forma, que o embebimento realizado para este tipo de sensores é adequado ao material

compósito utilizado, e, particularmente na realização de placas laminadas, com a capacidade de funcionar como sensor, e com o potencial futuro de uma possível actuação.

## 9.5 – Conclusão

A placa multisensora apresenta-se com um bom comportamento às solicitações impostas, caso da flexão de três e quatro pontos. Os ensaios realizados à frequência de 10 Hz mostram que os valores dos sensores colocados no interior das placas, embebidos entre as camadas intermédias do material compósito, são constantes ao longo do ensaio, de forma que é possível colocar dois segmentos de recta paralelas a limitar os valores máximos e mínimos obtidos, sendo que todos os ciclos atingem esses segmentos de recta. Mesmo a frequências superiores, até próximo dos 100 Hz, foi possível obter um bom comportamento destes. A partir dos 100 Hz e mesmo a esta frequência, os sensores em rede de Bragg e o extensómetro apresentam uma forma comportamental que difere da forma da força aplicada. Situação que também evidencia as limitações do sistema de aquisição. Torna-se assim mais claro que estes dois últimos sensores são muito mais eficientes a baixas frequências, aonde os piezoeléctricos podem não ter um comportamento tão bom. Principalmente se a intervenção a que ela ficar sujeita provocar uma deformação temporária e ficar nessa posição, por exemplo, o piezoeléctrico, possivelmente não identifica essa deformação. Contrariamente às redes de Bragg, que apesar das interrupções a que possam ser sujeitas, ao retomar a observação elas mostram sempre a deformação a que estão sujeitas naquele instante. Quanto ao interferómetro, infelizmente não foi possível usar as suas possibilidades como sensor de vibração, através da detecção das emissões acústicas, ou mesmo das deformações, o que também seria uma mais valia, dado que a componente da temperatura neste caso, não seria mais uma variável no sistema, partindo do princípio que o tubo capilar é do mesmo material que a fibra óptica.



# Capítulo 10

## 10 – Conclusão

### 10.1 – Conclusões

O trabalho apresentado nesta dissertação consistiu em investigar e implementar o embebimento dos sensores em fibra óptica, principalmente as redes de Bragg gravadas em fibra óptica, em materiais compósitos laminados. As placas compósitas laminadas possuem espessuras muito finas, da ordem dos 350  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$ , para as placas realizadas em fibra de carbono/epóxico e fibra de vidro/epóxico, respectivamente. Sendo também implementadas placas laminadas de maior espessura, da ordem de 1 mm.

A motivação para esta investigação deve-se ao facto de uma grande parte das estruturas poderem ser feitas com base em placas laminadas, como é o caso de algumas estruturas sanduíche. Assim, uma das peles, ou se houver necessidade, as duas, podem ser monitorizadas permanentemente, através de integração de sensores ópticos, desde a fase de fabrico e, posteriormente, ao longo de todo o seu tempo de vida útil.

Para conseguir embeber as redes de Bragg em placas de pequenas espessuras foi necessário utilizar camadas de tecidos pré-impregnados com microestruturas complexas como é o caso do “twill” 2/2. O embebimento das redes de Bragg neste tipo de tecidos é conhecido por induzir alterações na resposta do sensor. Para ultrapassar essa limitação, que teria como consequência uma leitura errada da deformação, foi desenvolvida uma metodologia de embebimento. O processo de desenvolvimento foi acompanhado por observações da resposta espectral em reflexão dos sensores ópticos, nas várias configurações e metodologias do embebimento, que consideram a utilização de sensores com revestimento na zona da rede de Bragg, mas também sem qualquer revestimento nesta zona. Numa fase inicial, era evidente a necessidade de utilizar sensores ópticos com revestimento na zona da rede para o proteger. No entanto, com as alterações introduzidas na metodologia de produção das placas sensoras, a utilização dos sensores com a zona da rede sem qualquer revestimento, tornou-se estável, perfeitamente reproduzível e sem alterações significativas à forma do espectro em reflexão das redes.

Um dos objectivos destas placas laminadas é a sua aplicação como sensores quando colados a estruturas, nomeadamente de grande porte. Dada a capacidade de multiplexagem das redes de Bragg, podem-se constituir múltiplos sensores com um único ponto de ligação ao sistema de interrogação e aquisição, e dada a sua grande sensibilidade quer em tracção quer em flexão, poderão determinar qualquer variação que estas sofram, incluídas, por exemplo, num sistema de monitorização activo mais abrangente dando início a um processo de actuação em caso de necessidade. Este tipo de sistema torna-se particularmente útil para reservatórios ou tanques, assim como condutas de substâncias inflamáveis.

Os resultados dos testes dos ensaios mecânicos demonstraram a existência de um bom desempenho das placas sensoras, quer sejam elas à base de fibra de carbono, de fibra de vidro, mas também de resina de epóxico, comparativamente aos sensores usados como referência nas medições realizadas, tendo em conta aos limites superiores de deformação a que as placas ficam sujeitas.

O bom desempenho das placas sensoras na medição de deformação motivou a avaliação adicional da sua capacidade para a medição de vibrações. Este tipo de ensaios

consiste, normalmente, na excitação da estrutura a diferentes frequências. Deste modo, são induzidas na estrutura ondas de pressão que correspondem a níveis muito reduzidos de deformação. Dado o limite de resolução do sistema de interrogação do sensor óptico, os ensaios realizados apenas permitiram concluir que o nível de deformação induzido é inferior às centésimas da parte por milhão. Com base na experiência acumulada durante o trabalho, há a convicção que será extremamente difícil melhorar o desempenho do sistema de modo a estender a sua capacidade à medição directa de vibrações. Mesmo recorrendo a componentes electrónicos de elevado desempenho, o nível de ruído condiciona a resolução deste tipo de sistema, com a medição de deformações na ordem da parte por milhão. Deve salientar-se que esta situação não é exclusiva dos sistemas de fibra óptica, mas também comum aos sensores convencionais eléctricos. Razão pela qual há a necessidade de incorporar nas estruturas em que se pretendam medir vibrações, outros elementos sensores, como sejam os interferómetros.

A aplicação destas metodologias ao ensaio em flexão de placas compósitas instrumentadas com sensores de Bragg sujeitas a cargas dinâmicas foi demonstrada com sucesso. Tal permite efectuar não só ensaios estruturais estáticos e dinâmicos, mas também testes de fadiga para planeamento de manutenção preventiva.

Dada a possibilidade de algumas destas placas poderem incorporar sensores mais sensíveis às vibrações, como sejam os interferómetros de Fabry-Pérot, elas podem, também, auxiliar de uma forma mais completa a monitorização e integridade de estruturas sensíveis, detectando, por exemplo, qualquer início de fissuração ou delaminação, impedindo desta forma que qualquer ruptura da estrutura, aproveitando, assim, todo o potencial das fibras ópticas, dada a sua imunidade a interferências electromagnéticas, ou a ausência de corrente eléctrica na cabeça do sensor.

Com o decorrer do trabalho, foi desenvolvida uma nova cabeça sensora, baseada no embebimento da fibra óptica em laminados compósitos híbridos. A configuração apresentada pode ser usada para medições simultâneas de pressão e de temperatura. Esta cabeça sensora teve por base as diferenças existentes nos materiais compósitos empregues, no caso, a fibra de carbono e a fibra de vidro. Desta forma, na nova placa sensora foi aproveitado o facto dos coeficientes de expansão térmica serem diferentes

nos dois materiais e, assim, permitirem a passagem de mais ou menos intensidade de luz, actuando de forma similar aos sensores de microcurvatura, em função das solicitações a que fica sujeita.

Esta configuração é particularmente apropriada para medições numa larga gama de sensores de pressão, nomeadamente em aplicações marítimas e/ou na indústria da engenharia civil, nas quais, muitas das vezes, não são requeridos intervalos de medição muito pequenos. Este novo material compósito inteligente, que simultaneamente mede pressão e temperatura, tem, como elemento sensor, três fibras ópticas monomodo embebidas num compósito laminado híbrido. O compósito inteligente pode operar numa gama até os 2500 kN/m<sup>2</sup> e os 60 °C. Para maiores pressões, a fibra óptica embebida entre as camadas da fibra de reforço, ainda apresenta alguma sensibilidade e, por isso, poderá ser usada.

As dimensões da placa compósita inteligente podem ser adaptadas em função das necessidades requeridas. Nesse sentido, se a placa apenas for usada como ponto de medida, ou ponto sensor e, nesse caso, as dimensões não são desprezáveis quando comparada com a estrutura à qual possa estar ligada. No entanto, se houver necessidade de ter em atenção a situação de reforço, como acontece em estruturas que se encontram já em serviço, e que por considerações de segurança necessitam de ser reforçadas, mas também de uma vigilância mais atenta ao seu comportamento, em que a placa sensora possa influenciar a estrutura a medir, nesse caso as dimensões devem ser consideradas e, dessa forma, realizar uma placa sensora ajustada à situação.

Foi também desenvolvido uma placa multisensora, embora ainda numa fase inicial, a qual possui embebidos sensores ópticos, como sejam, uma rede de Bragg e um interferómetro extrínseco de Fabry-Pérot, mas também um piezoeléctrico, com uma espessura total da placa de apenas 1 mm, possibilitando a sua aplicação numa gama sensorial mais ampla, mas também com a possibilidade de actuação.



## 10.2 - Trabalho futuro

As estruturas inteligentes, hoje em dia, já começam a possuir alguns atributos até há muito pouco tempo considerados exclusivos da raça humana. O processador electrónico que coordena a estrutura tem agora novas possibilidades: a capacidade de aprender pela experiência, e a faculdade de antecipar situações por ele interpretadas como perigosas. Assim, o referido processador “reage”, isto é, trata e transmite a informação, a uma velocidade superior à do sistema nervoso. No homem, a informação desloca-se sob a forma de pulsações electroquímicas, a uma velocidade da ordem dos cem metros por segundo, enquanto que no processador, a informação pode deslocar-se à velocidade da luz.

A metodologia de programação, também ela em desenvolvimento, tem contemplado a aplicação de diversas técnicas, desde os algoritmos genéticos à lógica auto-adaptativa. Esta última metodologia, a mais desenvolvida e inclusivamente já aplicada em caixas de velocidades automáticas de veículos automóveis sob a designação de caixa-activa, possui a capacidade de definir de entre as dezenas de critérios em análise, quais os mais importantes num dado momento. A metodologia auto-adaptativa obedece a uma lógica vaga de funcionamento, que permite, por exemplo, que dados contraditórios não venham a paralisar a reacção dos microprocessadores.

No decorrer do trabalho, foram registadas algumas situações anómalas, que presumivelmente terão a ver com algum comportamento entre a fibra óptica e o material compósito, principalmente na zona de interface, onde se localiza o sensor, e que não esteja a ser contemplado. Por isso há ainda aí algum trabalho a desenvolver, realizando um estudo mais exaustivo, quanto ao processo de transferência de carga na zona da interface fibra óptica/material compósito.

A distribuição de deformações não uniformes geradas pela compressão exercidas pelas fibras de reforço adjacentes à fibra óptica, presume-se que tenham alguma contribuição para algumas anomalias na forma do espectro das redes de Bragg, nas zonas limites de actuação das placas sensoras.

A placa multisensora será objecto de um estudo mais aprofundado, passando pelas diferentes possibilidades na implementação de outro tipo de sensores/actuadores, com espessuras mais finas e com boas capacidades de actuação, como seja por exemplo o PVDF (designação comercial para *Polyvinylidene fluoride*).

O desenvolvimento de soluções dedicadas à medição deste tipo de sinais obtidos pelos sensores embebidos em compósitos laminados constitui uma motivação adicional na utilização da fibra óptica. À imagem da metodologia implementada neste trabalho para a medição de deformação em placas compósitas, este desenvolvimento futuro envolverá a especificação, desenho e implementação de novos sensores, semelhante à nova cabeça sensora de pressão e temperatura desenvolvida no decorrer deste trabalho, assim como o desenvolvimento de unidades de medição com capacidade para a medição de vibrações, bem como a avaliação do seu desempenho na determinação dos modos próprios de vibração em estruturas compósitas complexas. Há a convicção que será possível desenvolver novas metodologias com base em fibra óptica, com desempenho ao nível dos sensores de base eléctrica mais avançados.

Num futuro próximo, há a intenção de criar um sistema para monitorização de estruturas, com a implementação de uma rede sensorial, usando sensores diferenciados, em que a estrutura possa ter a capacidade de adaptabilidade funcional, ou seja uma verdadeira estrutura inteligente capaz de actuar em função da acção que lhe foi provocada. Isso passará, possivelmente, pela necessidade de embeber também o processador, embora esta tarefa comece a ficar cada vez mais facilitada, dados os avanços tecnológicos que vão ocorrendo, nomeadamente nos dispositivos de base nanotecnológica, para fazer o controlo de todo o sistema sensorial e de actuação.

## Anexo A – Artigos realizados no âmbito deste trabalho

---

*“Compósitos Laminados com Fibras Ópticas Embebidas por Diferentes Métodos de Fabrico”*, **C.A. Ramos**, António Torres Marques, Rui Silva, 4<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia, ISEP, 2004. (Comunicação oral).

*“A produção de Estruturas Sanduíche por RTM com Sensores de Fibra Óptica”*, **C.A. Ramos**, Célia Novo, Pedro Vieira, António Torres Marques, 4<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia, ISEP, 2004. (Comunicação oral).

*“Analyses of composites structures behaviour with embedded Bragg grating sensors”*, **C.A. Ramos**, J. Esteves, A.T. Marques, R. Silva, MATERIAIS2005, 21 a 23 Março, Aveiro, 2005. (Comunicação oral).

*“Simultaneous measurement of pressure and temperature using single mode optical fibres embedded in a hybrid composite laminated”*, O. Frazão, **C.A. Ramos**, N.M.P. Pinto, J.M. Baptista, A.T. Marques, Composite Science and Technology, 65, 1756 - 1760, 2005.

*“Health monitoring of composite structures by embedded FBG’s and Interferometric fabry-perot sensors”*, **C.A. Ramos**, R. de Oliveira, A.T. Marques, II ECCOMAS Thematic Conference on smart structures and materials, July 18-21, Lisbon, Portugal, 2005.

*“Monitorização da integridade de estruturas compósitas com sensores em fibra óptica”*, De Oliveira R., **Ramos C.A.**, Marques A.T., APAET6, 27-29 Julho, Ponta Delgada, Açores, 2005. (Comunicação oral).

*“Análise experimental de tensões em materiais compósitos utilizando sensores de Bragg Embebidos”*, C.A **Ramos**, J. Esteves., A.T. Marques, APAET6, 27-29 Julho, Ponta Delgada, Açores, 2005. (Comunicação oral).

*“Analyses of composites structures behaviour with embedded Bragg grating sensors”*, **C.A. Ramos**, J.L. Esteves, R.A. Silva, A.T. Marques, Materials Science Forum Vols. 514-516 pp. 614-618, 2006.

*“Behaviour of composite laminated with optical fibre sensor during the cure process”*, **C.A. Ramos**, O. Frazão, I. Dias, A.T. Marques, Materials Science Forum Vols. 514-516 pp. 629-632, 2006.

## Anexo A – Artigos realizados no âmbito deste trabalho

---

*“Modeling of fibre Bragg grating sensor plates”*, **C.A. Ramos**, R. de Oliveira, R.D.S.G. Campilho, A.T. Marques, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, June 5-8, Lisbon, Portugal, 2006. (Comunicação oral).

*“Behaviour of embedded Bragg grating sensors”*, J.L. Esteves, **C.A. Ramos**, R. Oliveira. M2D’2006, July 24-26, Porto, Portugal, 2006. (Comunicação oral).

*“Fiber optic sensors in thermoset polymers : fiber coating”*, P.J.R. Nóvoa, **C.A. Ramos**, Rui F.C. Oliveira, António T. Marques, ECCM12, 12<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials, 29<sup>th</sup> August-1<sup>st</sup> September, Biarritz, France, 2006. (Comunicação oral).

### Artigos Aceites para Publicação:

- R. de Oliveira, **C.A. Ramos**, A.T. Marques, “Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Pérot sensors”, aceite para publicação, Computer & Structures, 2006.
- **C.A. Ramos**, R. de Oliveira, O. Frazão, A.T. Marques, “Aplicação de sensores em fibra óptica embebidos para a monitorização da saúde de estruturas compósitas”, aceite para publicação, Mecânica Experimental, 2006.

## Anexo B – Ficha técnica da fonte óptica



### FIBERWHITE - SP ACCEPTANCE TEST REPORT

Date : Nov . 24th 2000

Model : 93/3627/EOG/01

Serial # : 11-359

#### MEASUREMENT CONDITIONS

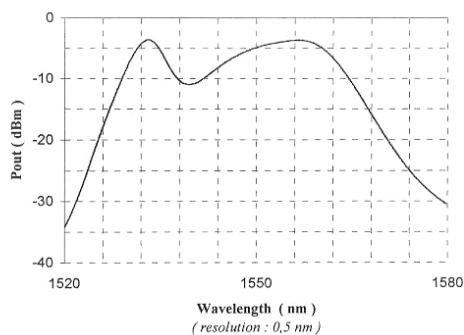
Maximum 980 nm pump current (*I<sub>max</sub>*) 316 mA

Flat spectrum 980 nm pump current (*I<sub>flat</sub>*) 236 mA

#### PERFORMANCES

|   | Specification | Test result  |
|---|---------------|--------------|
| Maximum output power<br>( @ <i>I<sub>max</sub></i> )                                    | > + 15 dBm    | + 16.7 dBm   |
| Spectral range<br>( @ - 10 dB below maximum power density ; @ <i>I<sub>flat</sub></i> ) | 1530-1565 nm  | 1528-1567 nm |
| Power stability<br>( over 1 hour ; @ + 13 dBm output power )                            | < 0.03 dB     | 0.016 dB     |
| Spectrum flatness<br>( over 1530-1560 nm ; @ <i>I<sub>flat</sub></i> )                  | < 8 dB        | 7.4 dB       |
| Output power<br>( @ <i>I<sub>flat</sub></i> )   | -             | + 15.4 dBm   |

#### SPECTRUM ( @ *I<sub>flat</sub>* )



Checked by : FIS

Signature :

Approved by : MGT

Signature :

52, AVENUE DE L'EUROPE - B.P. 39  
78160 MARLY-LE-ROI - FRANCE  
TÉLÉCOPIEUR : 01.39.17.77.00  
TÉLÉPHONE : 01.39.17.77.77

Société Anonyme au capital de 8.400.000 F  
R.C.S. Versailles B 314.899.972.00017  
Ident. TVA. CEE : FR 50 314 899 972

T-RED-FO-015-A

## Anexo C – Propriedades físicas da sílica

---

Na tabela 1, apresentam-se as propriedades físicas (mecânicas, eléctricas e ópticas) da Sílica.

Tabela 1 – Propriedades da Sílica.

| Designação                             | Símbolo        | Valor                 | Unidade             |
|--|----------------|-----------------------|---------------------|
| Temperatura de transição vítrea        | $T_g$          | 1100                  | ° C                 |
| Densidade                              | $\rho$         | 2.20                  | Kg dm <sup>-3</sup> |
| Coefficiente de expansão térmica       | $\alpha_L$     | $0.55 \times 10^{-6}$ | °K <sup>-1</sup>    |
| Coefficiente termo - óptico            | $\alpha_a$     | $8.60 \times 10^{-6}$ | °K <sup>-1</sup>    |
| Módulo de Young                        | E              | 73.1                  | GPa                 |
| Dureza                                 | VH             | 461                   | Kg mm <sup>-2</sup> |
| Coefficiente de Poisson                | $\nu_p$        | 0.17                  | -                   |
| Conductividade eléctrica a 20 ° C      | $-\log \sigma$ | 13                    | -                   |
| Índice de refração a 589 nm            | n              | 1.458                 | -                   |
| Variação térmica do índice de refração | $dn/dT$        | $10.0 \times 10^{-6}$ | °K <sup>-1</sup>    |

## Bibliografia

Andreas Othonos, Kyriacos Kalli, Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing, Artech House, Norwood, 1999.

## Anexo D – Ficha técnica da fibra óptica

### Resumo dos dados do fabricante

## Corning® SMF-28™ Optical Fiber Product Information

### Environmental Specifications

| Environmental Test Condition  | Induced Attenuation<br>1310 nm/1550 nm<br>(dB/km) |
|---|---|
| Temperature Dependence<br>-60°C to +85°C <sup>b</sup>                         | ≤ 0.05  |
| Temperature-Humidity Cycling<br>-10°C to +35°C <sup>a</sup> ,<br>up to 95% RH | ≤ 0.05  |
| Water Immersion, 23° ± 2°C <sup>a</sup>                                       | ≤ 0.05  |
| Heat Aging, 85° ± 2°C <sup>a</sup>  | ≤ 0.05  |

<sup>a</sup>Reference temperature: +23°C

### Operating Temperature Range

-60°C to +85°C

### Dimensional Specifications

**Length (km/reel):** fiber lengths available up to 50.4\*

\* Longer spliced lengths available as a premium.

### Glass Geometry

Fiber Curl: ≥ 4.0 m radius of curvature  
Cladding Diameter: 125.0 ± 0.7 µm  
Core-Clad Concentricity: ≤ 0.5 µm  
Cladding Non-Circularity: ≤ 1.0%

Defined as:  $\left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}}\right] \times 100$

### Coating Geometry

Coating Diameter: 245 ± 5 µm  
Coating-Cladding Concentricity: <12 µm

### Mechanical Specifications

#### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile proof stress ≥ 100 kpsi (0.7 GN/m<sup>2</sup>).

\* Higher proof test levels available as a premium.

### Performance Characterizations

*Characterized parameters are typical values:*

**Core Diameter:** 8.2 µm

**Numerical Aperture:** 0.14

NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

**Zero Dispersion Wavelength (λ<sub>0</sub>):** 1313 nm

**Zero Dispersion Slope (S<sub>0</sub>):** 0.086 ps/(nm<sup>2</sup>·km)

**Refractive Index Difference:** 0.36%

**Effective Group Index of Refraction, (N<sub>eff</sub>@ nominal MFD):**

1.4677 at 1310 nm

1.4682 at 1550 nm

**Fatigue Resistance Parameter (n<sub>f</sub>):** 20

#### Coating Strip Force:

Dry: 0.6 lbs. (3N)

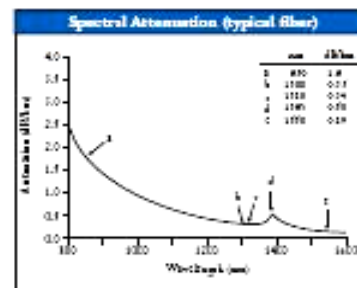
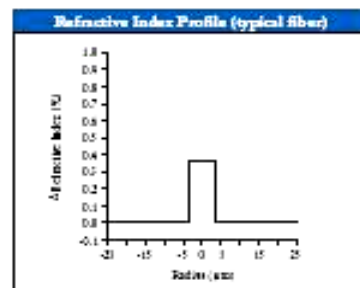
Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)

#### Rayleigh Backscatter Coefficient

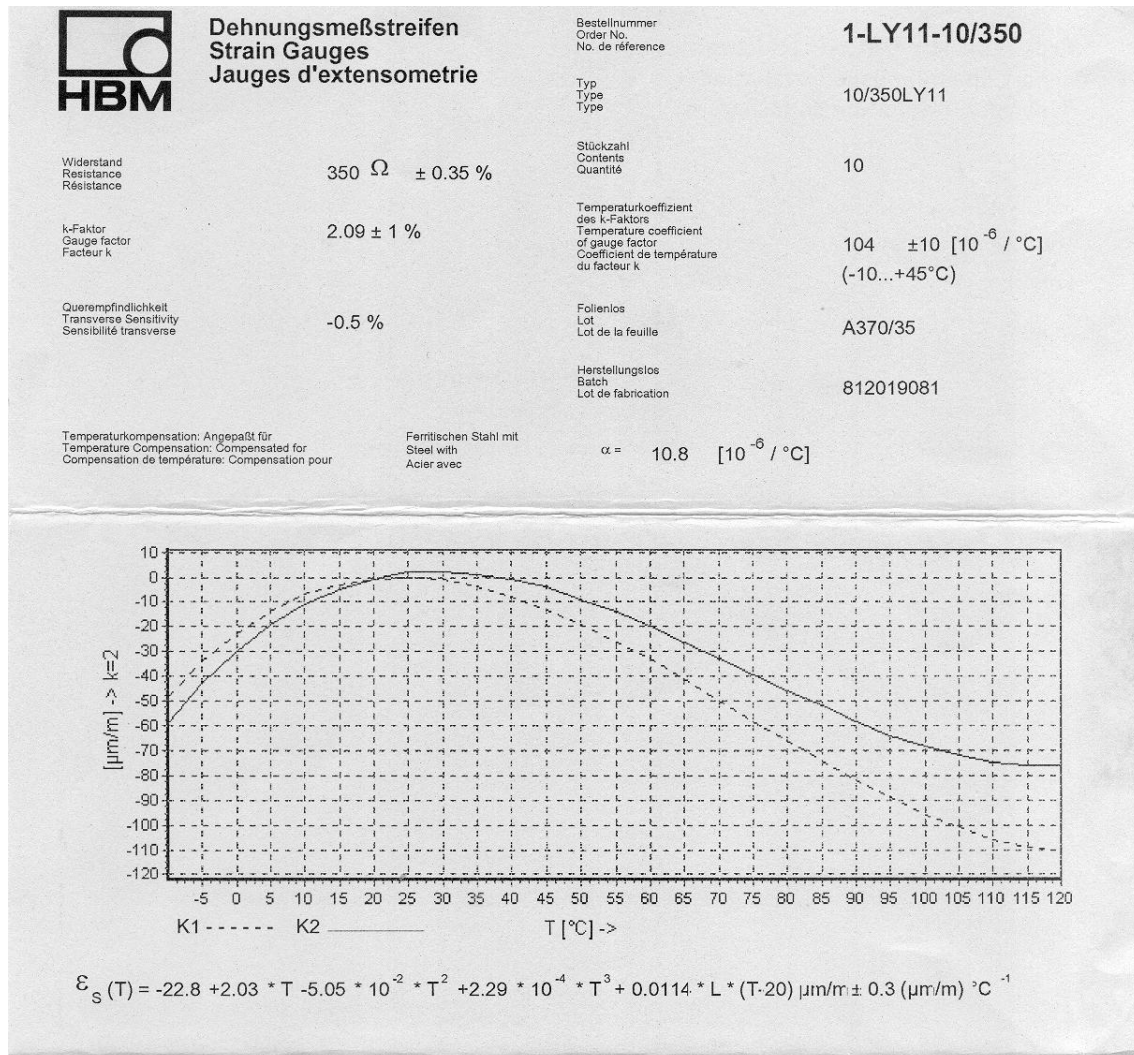
(for 1 ns pulse width):

1310 nm: -77 dB

1550 nm: -82 dB

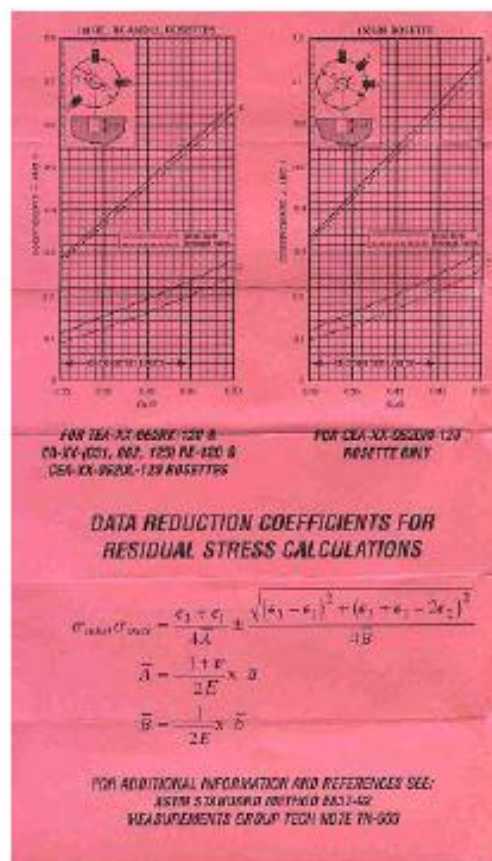
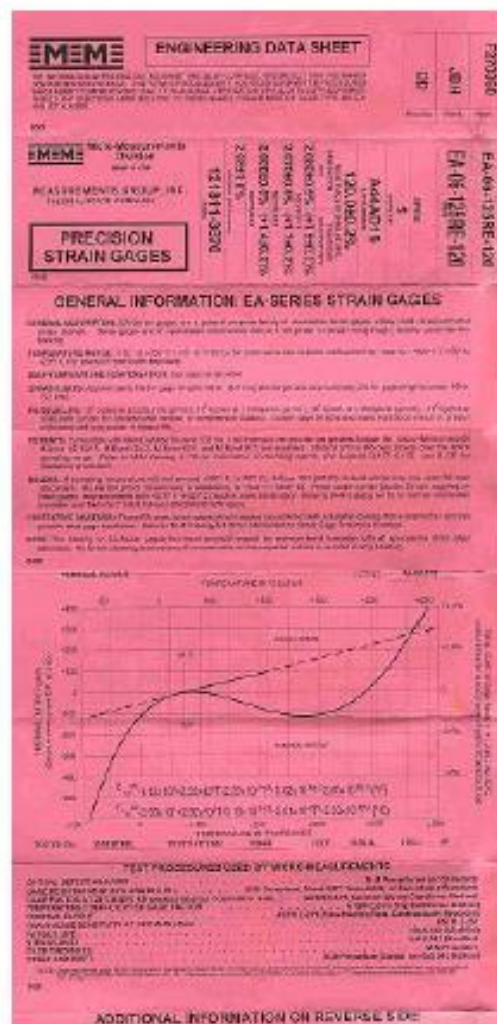


## Anexo E – Ficha técnica dos extensómetros eléctricos





## Anexo F – Ficha técnica da roseta eléctrica



$\text{mod. } 13$ 

CALIBRAGEM EFETUADA POR:

# Referências

1. E. Udd, ed., “Fiber Optic Smart Structures and Skins”, Proc. SPIE, Vol. 986, Bellingham, WA, 1989.
2. [www.fibersensing.com](http://www.fibersensing.com)
3. E. Udd, ed., “Fiber Optic Smart Structures and Skins II”, Proc. SPIE, Vol. 1170, Bellingham, WA, 1990.
4. E. Udd, R.O. Claus, ed., “Fiber Optic Smart Structures Skins III”, Proc. SPIE, Vol. 1370, Bellingham, WA, 1991.
5. R. O. Claus, E. Udd, eds., “Fiber Optic Smart Structures and Skins IV”, Proc. SPIE, Vol. 1588, Bellingham, WA, 1992.
6. G. I. Knowles, ed., “Active Materials and Adaptive Structures”, Proc. ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conference on Active Materials and Adaptive structures. IOP Publishing, Blackbury, VA, 1991.
7. B.Culshaw, P. T. Gardiner, and A. McDonach, eds., First European Conference on Smart Structures and Materials, SPIE, Vol. 1771, Bellingham, WA, 1992.
8. R. O. Claus, R. S. Rogowski, eds., “Fiber Optic Smart Structures and Skins V”, Proc. SPIE, Vol. 1798, Bellingham, WA, 1993.
9. E. Udd, “Embedded Sensors Make Structures Smart”, Laser Focus, May, p.138, 1988.
10. R. M. Measures, “Smart Structures in Nerves of Glass”, Prog. Aerosp. Sci. 26, p.289, 1989.
11. [www.nasa.com](http://www.nasa.com)
12. [www.airbus.com](http://www.airbus.com)
13. [www.boeing.com](http://www.boeing.com)
14. Defence Advanced Research Projects Agency ([www.darpa.mil](http://www.darpa.mil)).
15. J.Leng, A. Asundi, “Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors”, Sensors and Actuators A, 103, pp.330-340, 2003.
16. E. Udd, “Fibre Optic Smart Structure Technology”, In Fibre Optic Smart Structures, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-55448-0, pp.5-21, 1995.
17. D.A. Krohn, “Fibre Optic Sensors: Fundamentals and Applications”, Instrument Society of America, third edition, ISBN 1-55617-714-3, 2000.
18. J. Dakin, B. Culshaw, “Optical fibre sensors: Principles and components”, Artech House, ISBN 0-89006-317-6, 1988.
19. M. Le Blanc, R.M. Measures, “Fibre Optic Damage Assessment, In Fibre Optic Smart Structures”, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-55448-0, pp.518-613, 1995.

20. G. Zhou, L.M. Sim, "Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review", *Smart Material Structures*, Vol. 11, pp.925-939, 2002.
21. E. H. Urruti, P. E. Blaszyk, and R. M. Hawk, "Optical Fibers for Structural Sensing Applications", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 986, p.158, 1989.
22. R. L. Wood, A. K. Tay, and D. A. Wilson, "Design and Fabrication Considerations for Composite Structures with Embedded Fiber Optic Sensors", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1170, p.160, 1990.
23. W. Maslach, Jr. and J. S. Sirkis, "Strain or Stress Component Separation in Surface Mounted Interferometric Optical Fiber Strain Sensors", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1170, p.452, 1990.
24. D. W. Jensen and J. Pascual, "Degradation of Graphite/Bismaleimide Laminates with Multiple Embedded Fiber Optic Sensors", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1370, p.228, 1991.
25. J. S. Sirkis and A. Dasgupta, "Optimal Coatings for Intelligent Fiber Optic Sensors", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1370, p.129, 1991.
26. C. DiFrancia, R. O. Claus, and T. C. Ward, "Role of Adhesion in Optical-Fiber- Based Smart Composite Structures and Its Implementation in Strain Analysis for Modeling of an Embedded Optical Fiber", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1588, p.44, 1992.
27. A. R. Raheem-Kizchery, S. B. Desu, and R. O. Claus, "High-Temperature Refractory Coating Materials for Sapphire Waveguides", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1170, p.513, 1990.
28. K. A. Murphy, B. R. Fogg, C. Z. Wang, A. M. Vengsarkar, and R. C. Claus, "Sapphire Fiber Interferometer for Microdisplacement Measurements at High Temperatures", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1588, p.117, 1992.
29. H. Smith, Jr., A. Garrett, and C. R. Salf, "Smart Structure Concept Study", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, 1170, p.224, 1990.
30. E. Udd, J. P. Theriault, A. Markus, and Y. Bar-Cohen, "Microbending Fiber Optic Sensors for Smart Structures", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1170, p.478, 1990.
31. Z. J. Lu and F. A. Blaha, "Fiber Optic Strain and Impact Sensor System for Composite Materials", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1170, p.239, 1990.
32. D. A. Cox, D. Thomas, K. Reichard, D. Lindner, and R. O. Claus, "Model Domain Fiber Optic Sensor for Closed Loop Vibration Control of a Flexible Beam", *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.* 1170, p.372, 1990.
33. B. Y. Kim, J. N. Blake, S. Y. Huang, and H. J. Shaw, "Use of Highly Elliptical Core Fibers for Two-Mode Fiber Devices", *Opt. Lett.* 12, p.729, 1987.
34. O. Frazão, C.A. Ramos, N.M.P. Pinto, J.M. Baptista, A.T. Marques, "Simultaneous measurement of pressure and temperature using single mode optical fibres embedded in a hybrid composite laminated", *Composites Science and Technology* 65, pp.1756-1760, 2005.
35. T. Clark, H. Smith, "Microbend fiber optic sensors", *Fiber Optic Smart Structures*, ed. E. Udd, p.319, John Wiley & Sons, New York, 1995.
36. J. W. Berthold, "Historical review of microbend fiber-optic sensors", *OFS'94: 10th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Glasgow, p.182, 1994.
37. J. W. Berthold, "Historical review of microbend fiber-optic sensors", *J. Lightwave Technol.*, 13, (7), p.1193, 1995.

38. H. D. Simonsen, R. Paetsch, and J. R. Dunphy, "Fiber Bragg Grating Sensor Demonstration in Glass Fiber Reinforced Polyester Composite", Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. 1777, p.73, 1992.
39. G. Meltz, W. W. Morrey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg Grating in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method", Opt. Lett. 14, p.823, 1989.
40. W. W. Morey, "Distributed Fiber Grating Sensors", Proc. Opt. Fiber Sens., p.285, Sydney, 1990.
41. S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures, "Strain Sensing Using a Fiber Optics Bragg Grating", Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. 1588, p.255, 1992.
42. C. E. Lee and H. F. Taylor, "Interferometric Optical Fiber Sensors Using Internal Mirrors", Electron. Lett. 24, p.193, 1988.
43. C. E. Lee, R. A. Atkins, and H. F. Taylor, "Performance of a Fiber-Optic Temperature Sensor from -200°C to 1050°C", Opt. Lett. 13, p.1038, 1988.
44. T. Valis, D. Hogg, and R. M. Measures, "Fiber Optic Fabry-Perot Strain Sensor", IEEE Photon. Technol. Lett. 2, p.227, 1990.
45. C. E. Lee and H. F. Taylor, "Fiber Optic Fabry-Perot Sensor Using a Low Coherence Source", IEEE J. Lightwave Technol. LT-9, p.129, 1991.
46. C. E. Lee, H. F. Taylor, A. M. Markus, and E. Udd, "Optical Fiber Fabry-Perot Embedded Sensor", Opt. Lett. 14, p.1225, 1989.
47. T. Valis, D. Hogg, and R. M. Measures, "Composite Material Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Strain Rosette", Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. 1370, p.154, 1991.
48. K. A. Murphy, B. R. Fogg, G. Z. Wang, A. M. Vengsarkar, and R. O. Claus, "Sapphire Fiber Interferometer for Microdisplacement Measurements at High Temperatures", Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. 1588, p.117, 1992.
49. K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar, and R. O. Claus, "Fabry-Perot Fiber Optics Sensors in Full Scale Testing on an F-15 Aircraft", Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. 1588, p.134, 1992.
50. R. Measures, "Fiber Optic Strain Sensing", Smart Structures, E. Udd Ed., ISBN 0-471-55448-0, pp.171-247, 1995.
51. O. Frazão, N. Correia, C. Novo, A. Vieira, A.N. Costa, F. Araújo, A.T. Marques, "Optical Fibre Embedded in a Composite Laminate with Applications to Sensing", Bianisotropics, Lisboa, 2000.
52. C.A. Ramos, O. Frazão, I. Dias, A.T. Marques, "Behaviour of composite laminated with optical fibre sensor during the cure process", MATERIAIS2005, 21 a 23 Março, Aveiro, 2005.
53. Rui de Oliveira, "Health Monitoring of FRP using Acoustic Emission and Fibre Optic Techniques", Tese de Douturamento, FEUP, Universidade do Porto, 2005.
54. Anthony Kelly, "Concise Encyclopedia of Composite Materials", Pergamon, Cambridge, 1995.
55. M.V. Gandhi, B.S. Thomson, "Smart Materials and Structures", Chapman & Hall, USA, 1992.
56. I. Chopra, "Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems", AIAA Journal, Vol. 40, p.11, 2002.

- 
57. S. Lanceros-Méndez, M.V. Moreira, J.F. Mano, V.H. Schmidt, and G. Bohannan “Dielectric behavior in an oriented  $\beta$ -PVDF film and chain reorientation upon transverse mechanical deformation”, *Ferroelectrics*, 273, pp.2393-2398, 2002.
  58. [www.piezo.com](http://www.piezo.com)
  59. T.W. Chou, “Materials Science and Technology – Structure and Properties of Composites”, VCH, Cambridge, vol. 13, 1993.
  60. D.F. Jones, S.E. Prasad, J.B. Wallace, “Piezoelectric Materials and their applications”, *Advanced Ceramic Materials (Key Engineering Materials)*, 1996.
  61. [www.cv.ua.pt](http://www.cv.ua.pt)
  62. Daniel Gay, “Matériaux Composites”, 3 édition, Hermes, 1991.
  63. F.L. Matthews, R.D. Rawlings, “Composite Materials: Engineering and Science”, Chapman & Hall, London, pp.1-28, 1994.
  64. Jean-Marie Berthelot, “Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis”, *Mechanical Engineering Series*, Springer, 1998.
  65. António Torres Marques, “Introdução aos Materiais Compósitos”, DEMEGI/INEGI, 2001.
  66. R.F. Gibson, “Principles of Composite Materials”, McGraw-Hill International Editions, New York, 1994.
  67. Rui Miranda Guedes, “Fluência e Comportamento a Longo Prazo de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica”, DEMEGI/INEGI, 2001.
  68. Los Álamos National Laboratory, LA-13976-MS, 2003.
  69. [www.reinforcedplastics.com](http://www.reinforcedplastics.com).
  70. [www.rtpcompany.com](http://www.rtpcompany.com)
  71. [www.mouchel.com/asset](http://www.mouchel.com/asset)
  72. [www.fiberline.com](http://www.fiberline.com) ( Reinforced Plastics, Maio 2005).
  73. [www.owenscorning.com.br](http://www.owenscorning.com.br)
  74. [www.lm.dk](http://www.lm.dk)
  75. [www.cyclics.com](http://www.cyclics.com)
  76. [www.repower.de](http://www.repower.de)
  77. [www.toray.com](http://www.toray.com)
  78. L. Ye et al., “Functionalized composite structures for new generation airframes: a review”, *Composites Science and Technology*, 65, pp.1436-1446, 2005.
  79. [www.ducommun.com](http://www.ducommun.com)
  80. [www.airbus.com](http://www.airbus.com) (A340)
  81. [www.grouplotus.com](http://www.grouplotus.com) (Applications News, Reinforced Plastics, Maio 2005).
  82. [www.basf.de/ultramid](http://www.basf.de/ultramid)
  83. [www.xiraplas.pt](http://www.xiraplas.pt) (ou [www.reinforcedplastics.com](http://www.reinforcedplastics.com))
  84. [www.mitras.co.uk](http://www.mitras.co.uk)
  85. *Revista da Reinforced Plastics*, 2003.
  86. [www.eu-composites.com](http://www.eu-composites.com)

- 
87. [www.conform.nl/gb](http://www.conform.nl/gb)
  88. [www.vtplc.com](http://www.vtplc.com)
  89. [www.reinforcedplastics.com](http://www.reinforcedplastics.com) (Julho/Agosto 2005).
  90. Govind P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2<sup>a</sup> ed., Academic Press, San Diego, EUA, 1995.
  91. Ajoy Ghatak, K. Thyagarajan, "Introduction to Fiber Optics", Cambridge University Press, Londres, UK, 1999.
  92. K. T. V. Grattan, "Fiber optic techniques for temperature measurement", Optical Fiber Sensor Technology, K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, p.441, Chapman & Hall, London, 1995.
  93. E. Udd, "Fiber Optic Sensor Overview", Fiber Optic Smart Structures, E. Udd, John Wiley & Sons, New York, 1995.
  94. F. Bucholtz, D.M. Dagenais, K.P. Koo, S.Vohra, "Recent developements in fiber optic magnetostrictive sensors", Fiber Optic and Laser Sensors, 1367, p.226, 1990.
  95. R. Kashyap, "Fiber Bragg Grating", San Diego, Academic Press, 1999.
  96. A. Othonos, K. Kalli, "Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", London, Artech House, 1999.
  97. A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnan, E. J. Friebele, "Fiber Grating Sensor", Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp.1442-1462, 1997.
  98. E. Hecht, "Óptics", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1987.
  99. D.A. Krohn, "Fiber Optic Sensors in Industrial Applications: An Update", Proceedings of the ISA International Conference - Houston, Vol. 38, Part 2, pp.877-890, 1983.
  100. D.A. Krohn, "Fibre Optic Sensors: Fundamentals and Applications", Instrument Society of America, third edition, ISBN 1-55617-714-3, 2000.
  101. K. C. Kao, G. A. Hockham, "Dielectric fibre surface waveguides for optical frequencies", Proceedings. IEEE, vol.113, 7, pp.1151-1158, 1996.
  102. C. M. Davis, Fiber Optic Sensor Technology Handbook, Dynamic Systems, Reston, Virginia, 1982.
  103. M.E. Staff, "The Exciting Promise of Fiber-Optic Sensors", Mechanical Engineering, pp.60-65, Maio 1984.
  104. D. A. Krohn, "Fiber Optic Sensors in Industrial Applications: An Overview", Proceedings of the ISA International Conference -Philadelphia, Vol. 37, Part 3, pp.1673-1684, Outubro 1982.
  105. J. Hecht, "Fiber Optics Turns to Sensing", High Technology, pp.49-56, Julho/Agosto, 1983.
  106. McMahon, D. H., Nelson, A. R., and Spillman, W. B., "Fiber-Optic Transducers", IEEE Spectrum, pp.24- 29, Dezembro 1981.
  107. T. G. Giallorenzi, et al., "Optical Fiber Sensor Technology", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. Q-E-18, No. 4, p.626, Abri11982.
  108. C. M. Davis, "Fiber Optic Sensors; An Overview", Optical Engineering, Vol. 24, No.2, pp. 347-351, 1985.
  109. J. H. Brehney, "Fiber Optic Sensors for Aircraft", Aerospace Engineering, pp.12-19. Setembro, 1988.

110. A.D. Kersey, M.A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Atkins, M.A. Putnam, E.S. Friebach,, "Fiber Grating Sensors", *Journal of Lightwave Tech.*, Vol. 1, No.8, pp.1442-1463, 1997.
111. J. W. Berthold, "Overview of fiber-optic intensity sensors for industry", *SPIE, Fiber Optic and Laser Sensors V*, 838, p.2, 1988.
112. B.E. Jones, R.S. Medlock, R.C. Spooncer, "Intensity and Wavelength-Based Sensors and Optical Actuators", in *Optical Fibre Sensors: Systems and Applications*, 11, B. Culshaw and J. Dakin, p.431, Artech House, Norwood, 1989.
113. D.A. Krohn, "Intensity modulation fiber optic sensors: overview", *SPIE -Fiber Optic and Laser Sensors IV*, 718, p.2, 1986.
114. R. Philip-Chandy, P. J. Scully, P. Eldridge, H. J. Kadim, M. G. Grapin, M. G. Jonca, M. G. D' Ambrosio, F. Colin, "An optical fiber sensor for biofilm measurement using intensity modulation and image analysis", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6, (5), p.764, 2000.
115. R. S. Mellberg, "Fiber Optic Sensors", *SRI International, Research Report No.684*. 1983.
116. E. R. Cox, B. E. Jones, "Fibre optic colour sensors based on Fabry-Perot interferometry", *OFS'83: 1st International Conference on Optical Fiber Sensors*, London, p.122, 1983.
117. D.A. Jackson, "Monomode optical fibre interferometers for precision measurement", *Journal of Physics E: Scientifics Instruments*, 18, p.981, 1985.
118. A. Dandridge, A. D. Kersey, "Overview of Mach-Zehnder sensor technology and applications", *SPIE- Fiber Optic and Laser Sensors VI*, 34, p.985, 1988.
119. G. L. Mitchell, "A review of Fabry-Perot interferometric sensors", in *Optical Fiber Sensors*, 44, p. 450, Springer- Verlag, Berlin, 1989.
120. A. A. Chtcherbakov, P. L. Swart, S. J. Spammer, "Mach-Zehnder and modified Sagnac-distributed fiber- optic impact sensor", *Appl. Optics*, 37, (16), p.3423, 1998.
121. W. Lee, J. Lee, C. Henderson, H. Taylor, R. James, C. Lee, V. Swenson, R. Atkins, W. Gemeiner, "Railroad bridge instrumentation with fiber-optic sensors", *Appl. Optics*, 38, (7), p.1110, 1999.
122. K. Pran, G. B. Havsgard, R. Palmstrom, G. Wang, "Sea-test of a 27 channel fibre Bragg grating strain sensor system on an air cushion catamaran", *OFS'99: 13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Kyongju, p.145, 1999.
123. P. K. C. Chan, W. Jin, J. M. Gong, M. S. Demokan, "Multiplexing of fiber Bragg grating sensors using an FMCW technique", *IEEE Photonics Technol. Let.*, 11, (II), p.1470, 1999.
124. C. J. Misas, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, J. M. Lopez-Higuera, "Fiber Bragg sensors interrogation based on carrier generation by modulating the coupling length of a Wavelength-Division Multiplexer", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6, (5), p.750, 2000.
125. P. K. C. Chan, W. Jin, M. S. Demokan, "FMCW multiplexing of fiber Bragg grating sensors", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6, (5), p.756, 2000.
126. B. E. Jones, S. J. Collier, "Effects and devices for optical fibre sensors using wavelength modulation", *Conference on Electro-Optics and Lasers*, p.25, 1986.
127. J. M. Gong, C. C. Chan, W. Jin, J. M. K. MacAlpine, M. Zhang, Y. B. Liao, "Enhancement of wavelength detection accuracy in fiber Bragg grating sensors by using a spectrum correlation technique", *OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Portland, p.155, 2002.



128. J. Cheong, Y. Kim, U. Paek, B. Lee, "Measurements of wavelength-dependent photosensitivity by using long-period fiber gratings", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.175, 2002.
129. A. D. Kersey, M. A. Davis, et. al., "Fiber grating sensors", J. Lightwave Technol., 15, (8), p.1442, 1997.
130. G. Oscroft, "Intrinsic fiber optic sensors", SPIE - Fiber Optics, 734, p.207, 1987.
131. H. Lehmann, G. Schwotzer, P. Czerney, R. Willsch, "Low-cost intrinsic fiber optic pH sensor using Sol-Gel immobilized NIR dyes", OFS'96: 11th International Conference on Optical Fiber Sensors, Sapporo, p.426, 1996.
132. Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, T. Sun, B. T. Meggitt, "Rare-earth-doped intrinsic fiber-optic sensors for high temperature measurement", OFS'97: 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, Williamsburg, p.556, 1997.
133. H. L. Rivera, J. A. Garca-Souto, J. Sanz, "Measurements of mechanical vibrations at magnetic cores of power transformers with fiber-optic interferometric intrinsic sensor", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 6, (5), p.788, 2000.
134. C. Fernandez-Valdivielso, I. R. Matias, M. Gorraiz, F. J. Arregui, C. Barriain, M. Lopez-Amo, "Low cost electric field optical fiber detector", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.499, 2002.
135. Y. Wang, Y. Rao, A. Hu, X. Zeng, Z. Ran, T. Zhu, "A novel fiber-optic torsion sensor based on a Co<sub>2</sub>-laser- induced long-period fiber grating", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.147, 2002.
136. Y. T. Cho, T. P. Newson, "Brillouin-based distributed fibre temperature sensor at 1,53  $\mu$ m using Raman amplification", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.305, 2002.
137. H. Inaba, K. Chan, H. Ito, "All-optical remote gas sensor system over a 20 km range based on low-loss optical fibers in the near infrared region", OFS'84: 2nd International Conference on Optical Fibre Sensors, Stuttgart, p.211, 1984.
138. F. A. Muhammad, H. S. Al-Raweshidy, J. M. Senior, "Analysis of curved D-fiber for methane gas sensing", IEEE Photonics Technol. Let., 7, (5), p.538, 1995.
139. D. P. Saini, S. L. Coulter, "Fiber sensors sniff out environmental pollutants", Photonics Spectra, p.91, Março 1996.
140. K. G. Tatterson, "Pollutants, can't hide from fiber optic sensors", Photonics Spectra, p.116, Abril 1998.
141. J. Clowes, J. Edwards, I. Grudin, E. L. E. Kluth, M. P. Varnham, M. N. Zervas, C. M. Crawley, R. L. Kutlik, "Low drift fibre optic pressure sensor for oil field downhole monitoring", Electronic Letters, 35, (11), p.926, 1999.
142. L. A. Toupin, "Telecom, fiber sensors, and displays on upswing", OE magazine, p.19, Maio 2001.
143. D. Inaudi, N. Casanova, "SMARTEC: bringing fiber optic sensors into concrete applications", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.27, 2002.
144. D. L. Gysling, A. Kersey, "Changing paradigms in oil and gas reservoir monitoring -the introduction and commercialization of in-well optical sensing systems", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.43, 2002.

- 
145. G. Orellana, M. C. Moreno-Bondi, "From molecular engineering of luminescent indicators to environmental analytical chemistry in the field with fiber-optic (bio)sensors", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.115, 2002.
  146. R. S. Medlock, "Fibre optic intensity modulated sensors", NATO Advanced Study Institute, 466, p.131, 1987.
  147. K.O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication", Appl. Phys. Lett. 32, pp.647-649, 1978.
  148. B. S. Kawasaki, K. O. Hill, D. C. Johnson and Y. Fujii, "Narrow – band Bragg reflectors in optical fibers", Opt. Lett. 3, pp.66-68, 1978.
  149. G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method", Opt. Lett. 14, pp.823-825, 1989.
  150. R. M. Atkins, P. J. Lemaire, T. Erdogan, V. Mizrahi, "Mechanisms of Enhanced UV Photosensitivity via Hydrogen Loading in Germanosilicate", IEEE, vol.29, 14, pp. 1234-1235, 1993.
  151. J. Stone, "Interactions of Hydrogen and Deuterium with Silica Optical Fibers: A Review", Journal of Lightwave Technology, vol.5, 5, pp.712-733, 1987.
  152. C. L. Liou, L. A. Wang, M. C. Ahih, T. J. Chuang, "Characteristics of hydrogenated fiber Bragg gratings", Applied Physics A, vol.64, pp.191-197, 1997.
  153. F. M. Araújo, "Redes de Bragg em Fibra Óptica", Tese de Doutorado, FCUP, Universidade do Porto, Porto, 1999.
  154. D. K. W. Lam, B. K. Garside, "Characterization of single – mode optical fiber filters", Appl. Opt. 20, p.440-445, 1981.
  155. P.E. Dyer, R.J. Farley, R. Giedl, "Analysis of grating formation with excimer-laser irradiated phase masks", Opt. Comun., MAR 15, 115, pp.327-334, 1995.
  156. M. G. Shlyagin, D. Tentori, "Fiber-Optic interferometric quasi-distributed sensor using polarization-maintaining fiber", OFS'96: 11th International Conference on Optical Fiber Sensors, Sapporo, p.546, 1996.
  157. M. Volanthen, H. Geiger, J. P. Volanthen, J. P. Dakin, "Low-crosstalk real-time monitoring of optical path length in multiple fibre sections using range-gated subcarrier interferometry", OFS'96: 11th International Conference on Optical Fiber Sensors, Sapporo, 682, p.55, 1996.
  158. D. C. Bownass, J. S. Barton, J. D. C. Jones, "Serially multiplexed point sensor for the detection of high humidity in passive optical networks", Optics Letters, 22, (5), p.346, 1997.
  159. B. J. Vakoc, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, "A novel fiber-optic sensor array based on the Sagnac interferometer", J. Lightwave Technol., 17, (11), p.2316, 1999.
  160. P. A. Wallace, N. Elliott, M. Uttamlal, A. S. Holmes-Smith, M. Campbell, "Development of a quasi- distributed optical fibre pH sensor", OFS'2000: 14th International Conference on Optical Fiber Sensors, Venice, p.456, 2000.
  161. H.L. Ho, W. Jin, H.B. Yu, K.C. Chan, C.C. Chan, M.S. Demokan, "Experimental demonstration of a fiber- optic gas sensor network addressed by FMCW", IEEE Photonics Technol. Let., 12, (II), p.1546, 2000.
  162. J. A. Garcia-Souto, H. L. Rivera, "Multichannel fiber-optic interferometric sensor for measurements of temperature and vibrations in composite materials", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 6, (5), p.780, 2000.
-

163. M. Zavrsnik, G. Stewart, "Coherence addressing of quasi-distributed absorption sensors by the FMCW method", *J. Lightwave Technol.*, 18, (1), p.57, 2000.
164. L. Ramakrishnan, L. Unger, R. Kist, "Line loss independent fiberoptic displacement sensor with electrical subcarrier frequency phase encoding", *OFS'88: 5th International Conference on Optical Fiber Sensors*, New Orleans, 2, p.133, 1988.
165. D. R. Miers, D. Raj, J. W. Berthold, "Design and characterization of fiber-optic accelerometers", *SPIE Fiber Optic and Laser Sensors V*, 838, p.314, 1987.
166. A. Garcia-Valenzuela, M. Tabib-Azar, "Fiber optic force and displacement sensor based on speckle detection with 0,1 nano-Newton and 0,1 Angstrom resolution", *SPIE -Integrated Optics and Microstructures*, 1793, p.247, 1993.
167. K. A. Murphy, M. F. Aunther, R. O. Claus, T. A. Tran, M. S. Miller, "Optical fiber sensors for measurement of strain and acoustic waves", *SPIE -Smart Sensing, Processing and Instrumentation*, 1918, p.110, 1993.
168. J. W. Berthold, W. L. Ahering, D. Varshneya, "Design and characterization of a high temperature fiber-optic pressure transducer", *J. Lightwave Technol.*, LT-5, (7), p.870, 1987.
169. A. Booyesen, P. L. Swart, B. M. Lacquet, S. J. Spammer, "Wavelength insensitive fiber optic sensor based on an axially fused coupler", *Opt. Eng.*, 35, (10), p.2788, 1996.
170. M. Morante, A. Cobo, J. M. Lopez-Higuera, M. Lopez-Amo, "New approach using a bare fiber optic cantilever beam as a low-frequency acceleration measuring element", *Opt. Eng.*, 36, (6), p.1700, 1996.
171. M. D. Wheeler, "Fiber sensors ensure train safety", *Photonics Spectra*, p.32, Maio 2001.
172. Z. Zhiqiang, M. Mac Alpine, M. S. Demokan, "The directionality of an optical fiber high-frequency acoustic sensor for partial discharge detection and location", *J. Lightwave Technol.*, 18, (6), p.795, 2000.
173. Z. Hu, Y. Zhang, Z. Pan, Q. Tang, "Digital closed-loop re-entrant fiber-optic rotation sensor with amplified Sagnac loop", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 12, (8), p.1040, 2000.
174. S. Kim, I. Kwon, S. Kim, B. Lee, "Temperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tube", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 12, (6), p.678, 2000.
175. Y. Liu, L. Zhang, I. A. R. Williams, I. Bennion, "Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-period fiber grating", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 12, (5), p.531, 2000.
176. Y. Lin, T. Lin, Y. Kuo, L. Wang, K. Chang, "Application of FBG sensors to strain and temperature monitoring of full scale pre-stressed concrete bridges", *OFS'2002 : 15th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Portland, p.211, 2002.
177. S.C. Rashleigh, "Origins and control of polarization effects in single-mode fibers", *J. Lightwave Technol.* 1, pp.312-31, 1983.
178. J. Noda, K. Okamoto, Y. Sasaki, "Polarization-maintaining fibers and their applications", *J. Lightwave Technol.* 4, pp.1071-89, 1986.
179. R.B. Dyott, J.R. Cozens, D.G. Morris, "Preservation of polarization in optical-fiber waveguides with elliptical cores", *Electron. Lett.* 15, pp.380-2, 1979.
180. V. Ramaswamy, W.G. French, R.D. Standley, "Polarization characteristics of noncircular core single-mode fibers", *Appl. Opt.* 17, pp.3014-7, 1978.

- 
181. K. A. Wickersheim, M. H. Sun, "Fiberoptic thermometry and its applications", *Journal of Microwave Power*, p.85, 1987.
  182. R. R. Dils, "High-temperature optical fiber thermometer", *Journal of Applied Physics*, 54, (3), p.1198, 1983.
  183. I. P. Dakin, D. I. Pratt, G. W. Bibby, I. N. Ross, "Temperature distribution measurement using Raman ratiothermometry", *Fiber Optic and Laser Sensors* 111, 566, p.249, 1985.
  184. C. Lecot, I. I. Guerin, M. Lequime, M. Rioual, "White light fiber optic sensor network for the thermal monitoring of the stator in a nuclear power plant alternator", *OFS'93: 9th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Florence, p.271, 1993.
  185. A. Gaston, I. Senosiain, I. Diaz, I. Sevilla, "High sensitivity temperature sensor based on side-polished fiber optic", *17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1615, p.148, 2000.
  186. A. Alvarez-Herrero, H. Guerrero, T. Belenguer, D. Levy, "High-sensitivity temperature sensor based on overlay on side-polished fibers", *IEEE Photonics Technol. Let.*, 12, (8), p.1043, 2000.
  187. A. F. Fernandez, B. Brichard, P. Borgermans, F. Berghmans, M. Decreton, P. Megret, M. Blondel, A. Delchambre, "Fibre Bragg grating temperature sensors for harsh nuclear environments", *OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Portland, p.63, 2002.
  188. S. W. James, S. Khaliq, R. P. Tatam, "Enhanced sensitivity fibre optic long period grating temperature sensor", *OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Portland, p.139, 2002.
  189. S. T. Vohra, F. Bucholtz, A. D. Kersey, "A fiber optic and low frequency electric field sensor", *OFS'92: 8th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Monterey, p.418, 1992.
  190. K. Kyuma, S. Tai, M. Nunoshita, N. Mikama, Y. Ida, "Fiber-optic current and voltage sensors using a Bi<sub>2</sub>GeO<sub>20</sub> single crystal", *I. Lightwave Technol.*, LT-1, (1), p.93, 1983.
  191. G. W. Day, M. N. Deeter, A. H. Rose, "Faraday effect sensors: a review of recent progress", *SPIE -Advances in Optical Fiber Sensors*, PM07, p. II, 1992.
  192. G. W. Day, A. H. Rose, "Faraday effect sensors: the start of the art", *SPIE -Fiber Optic Laser Sensors VI*, 985, p.138, 1988.
  193. F. Bucholtz, D. M. Dagenais, K. P. Koo, S. Vohra, "Recent developments in fiber optic magnetostrictive sensors", *SPIE- Fiber Optic and Laser Sensors*, 1367, p.226, 1990.
  194. T. Priest, G. B. Scelsi, G. A. Woolsey, "Electric-field sensing using a low-coherence Fabry-Perot optical fiber interferometer", *OFS'97: 12th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Williamsburg, p. 241, 1997.
  195. A. H. Rose, S. M. Etzel, K. B. Rochford, "Optical fiber current sensors in high electric field environments", *I. Lightwave Technol.*, 17, (6), p.1042, 1999.
  196. I. Mora, A. Dfez, I. L. Cruz, M. V. Andres, "A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for dc- current and temperature discrimination", *IEEE Photonics Technol. Let.*, 12, (12), p.1680, 2000.
  197. V. N. Filippov, A. N. Starodumov, V. P. Minkovich, Y. O. Barmenkov, "Optically controlled fiber voltage sensor", *IEEE Photonics Technol. Let.*, 12, (7), p.870, 2000.
  198. G. A. Sanders, I. N. Blake, A. H. Rose, F. Rahmatian, C. Herdman, "Commercialization of fiber-optic current and voltage sensors", *OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Portland, p.31, 2002.
-

- 
199. W. Gaebler, D. BraUnig, "Application of optical fiber waveguides in radiation dosimetry", IEE 1st International Conference on Optical Fibre Sensors, London, p.185, 1983.
  200. P. B. Lyons, "Fiber-optic radiation sensors", OFS'85: 3th International Conference on Optical Fiber Sensors, San Diego, p.126, 1985.
  201. P. R. Forman, "Interferometric fiber-optic radiation sensor", OFS'93: 9th International Conference on Optical Fiber Sensors, Florence, p.147, 1993.
  202. B. M. Rogina, "Radiation testing of PCS optical fiber for dose-level sensor application", OFS'94: 10th International Conference on Optical Fiber Sensors, Glasgow, p.468, 1994.
  203. O. Roy, S. Magne, I. C. Gaucher, L. Albert, L. Dusseau, I. C. Bessiere, P. Ferdinand, "All optical fiber sensor based on optically stimulated luminescence for radiation detection", OFS '97: 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, Williamsburg, p.666, 1997.
  204. H. H. Miller, T. B. Hirschfeld, "Fiber optic chemical sensors for industrial and process control", SPIE -Fiber Optic and Laser Sensors IV, 718, p.39, 1986.
  205. O. S. Wolfbeis, "Novel techniques and materials for fiber optic chemical sensors", in Optical Fiber Sensors, 44, p.416, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
  206. M. Tabacco, Q. Zhou, B. Nelson, "Chemical sensors for environmental monitoring", SPIE-Chemical, Biomedical, and Environmental Fiber Sensors 111, 1587, p.271, 1991.
  207. N. D. McMillan, O. Finlayson, F. Fortune, M. Fingelton, D. Daly, D. Townsend, D. D. G. McMillan, M. I. Dalton, "The fibre drop analyser: a new multianalyser analytical instrument with applications in sugar processing and for the analysis of pure liquids", Meas. Sci. Technol., 3, p.746, 1992.
  208. M. Brenici, F. Baldini, "Fiber optic optrodes for chemical sensors", OFS'92: 8th International Conference on Optical Fiber Sensors, Monterey, p.313, 1992.
  209. I. Schneider, G. Nau, T. V. V. King, I. Aggarwal, "Fiber-optic near-infrared reflectance sensor for detection of organics in soils", IEEE Photonics Technol. Let., 7, (1), p.87, 1995.
  210. I. A. Ferguson, D. R. Walt, "Optical fibers make sense of chemicals", Photonics Spectra, p.108, 1997.
  211. H. Hogan, "Fiber probes engine oil", Photonics Spectra, p.29, Abril, 2001.
  212. L. Ciaccheri, P. R. Smith, A. G. Mignani, "Two-wavelength nephelometry for the recognition of particulates using optical fibers", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.253, 2002.
  213. G. Stewart, H. Yu, G. Whitenett, B. Culshaw, "A mode-locked fibre laser system for multi-point intra-cavity gas spectroscopy", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.257, 2002.
  214. G. D. Pitt, A. M. Prabakaran, R. I. Williamson, D. Wilson, D. N. Batchelder, "Optical fibre flowmeters", OFS'84: 2nd International Conference on Optical Fiber Sensors, Stuttgart, p.23, 1984.
  215. P. Extance, G. D. Pitt, B. I. Scott, M. V. Verrells, "Intelligent turbidity monitoring using fiber optics", IEE 1st International Conference on Optical Fibre Sensors, London, p.109, 1983.
  216. K. Spenner, H. Schulte, H. I. Boehnel, M. D. Singh, "Experimental investigations on fiber optic liquid level sensors and refractometers", IEE 1st International Conference on Optical Fibre Sensors, London, p.96, 1983.

- 
217. S. W. Lames, S. Khaliq, R. P. Tatam, "A long period grating liquid level sensor", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.127, 2002.
  218. A. M. Scheggi, "Optical fiber sensors in medicine", OFS'84: 2nd International Conference on Optical Fiber Sensors, Stuttgart, p.93, 1984.
  219. A. G. Mignani, F. Baldini, "In-vivo biomedical monitoring by fiber-optic systems", I. Lightwave Technol., 13, (7), p.1396, 1995.
  220. D. W. Lubbers, "Chemical in vivo monitoring by optical sensors in medicine", Sensors and Actuators B: Chemical, II, p.253, 1993.
  221. G. He, M. T. Wlodarczyk, "Catheter-type disposable fiber optic pressure transducer", OFS'93: 9th International Conference on Optical Fiber Sensors, Florence, p.463, 1993.
  222. B. Tremble, "Fifty thousand pressure sensors per year: a successful fiber sensor for medical applications", OFS'93: 9th International Conference on Optical Fiber Sensors, Florence, p.457, 1993.
  223. K. Ohba, N. Fujiwara, "Development of fiber optic laser Doppler velocimeter for measurement of local blood velocity", SPIE -Laser Anemometry: Advances and Applications, 2052, p.195, 1993.
  224. H. Bueker, F. W. Haesing, E. Gerhard, "Physical properties and concepts for applications of attenuation-based fiber optic dosimeters for medical instrumentation", SPIE -Fiber Optic Medical and Fluorescent Sensors and Applications, 1648, p.63, 1992.
  225. R. Narayanaswamy, "Current developments in optical biochemical sensors", Biosensors and Bioelectronics, 6, p.467, 1991.
  226. P. L. Swart, M. Lacquet, A. A. Chitchebakov, "Chirped fiber optic Bragg grating esophageal pressure sensor", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.235, 2002.
  227. Q. Chen, R. O. Claus, W. B. Spillman, F. J. Arregui, I. R. Matias, K. L. Cooper, "Optical fiber sensors for breathing diagnostics", OFS'2002: 15th International Conference on Optical Fiber Sensors, Portland, p.273, 2002.
  228. T. Liu, M. Wu, Y. Rao, D.A. Jackson, G.F. Fernando, "A multiplexed optical fibre-based extrinsic Fabry-Perot sensor system for in-situ strain monitoring in composites", Smart Mater. Struct., Vol. 7, pp.550-556, 1998.
  229. R.O. Claus, V.S. Sudarshanam, K.A. Murphy, "Interferometric optical fiber sensors for ultrasonic wave measurement", Smart Structures, E. Udd Ed., ISBN 0-471-55448-0, pp.563-580, 1995.
  230. M. Le Blanc, R.M. Measures, "Fibre Optic Damage Assessment", In Fibre Optic Smart Structures, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-55448-0, pp.518-613, 1995.
  231. J.S. Leng, A. Asundi, "Non-destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber Bragg grating sensors", NDT&E International, Vol. 35, pp.273-276, 2002.
  232. I. Read, P. Foote, S. Murray, "Optical fibre acoustic emission sensor for damage detection in carbon fibre composite structures", Measurement Science and Technology, Vol. 13, p.N5-N9, 2002.
  233. D.-H. Kim, B.-Y. Koo, Kim, C.-G., Hong, C.-S., Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system, Smart Mater. Struct., Vol. 13, pp.593-598, 2004.

- 
234. R.de Oliveira, , O.Frazão, , J.L.Santos, , A.T.Marques, , Optic fibre sensor for real time damage detection in smart composite, *Computers & Structures*, Vol. 82, pp.1315-1321, 2004.
235. R. de Oliveira, C.A. Ramos, A.T. Marques, "Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Pérot sensors", aceite para publicação na revista *Computer & Structures* em 2006.
236. E. Udd, S. Kreger, S. Calvert, M. Kunzler, T. Taylor, "Nondestructive Evolution of Composite Materials Using Multi-axis Grating Sensors", *Proceedings of SPIE*, Vol. 5278, p.1, 2003.
237. S. Skontorp, "Characterization of a fiber-Optic Strain Sensor for Health Monitoring of Composite Structures", *Proceedings of the American Society for Composites*, 15th Technical Conference, 2000.
238. K.S.C. Kuang, R. Kenny, M.P. Whelan, W.J. Cantwell, P.R. Chalker, "Embedded fibre Bragg grating Sensors in Advanced Composite Materials", *Composite Science and Technology*, Vol. 61, p.1379-1387, 2001.
239. Hiroaki Tsutsui, Akio Kawamata, Tomio Sanda, Nobuo Takeda, "Detection of impact damage of stiffened composite panels using embedded small-diameter optical fibers", *Smart Mater. Struct.* 13, pp.1284-1290, 2004.
240. Seiji Kojima, Shinji Komatsuzaki, Yoshinori Kurosawa, Akihito Hongo, "Embedding type strain sensors using small-diameter fiber Bragg grating to composite laminate structures", *Hitachi Cable Review*, 23, 2004.
241. W. Du, X.M. Tao, H.Y. Tam, C.L. Choy "Fundamentals and Applications of Optical Fiber Bragg Grating sensors to Textile Structural Composites", *Comp. Structures* 42, pp.217-29, 1998.
242. Yun – Jiang Rao, "In fiber Bragg grating sensors", *Meas. Sci. Technol.* 8, p.355-375, 1997.
243. M.J. Gander, W.N. McPherson, R. McBride, J.D.C. Jones, L. Shang, I. Bennion, P.M. Blanchard, J.G. Burnett, A.H. Greenaway, "Bend measurement using Bragg grating in multicore fiber", *Electronics Letters*, Vol. 36, pp.5-8, 2000.
244. F.M. Araújo, L.A. Ferreira, J.L. Santos, F. Farahi, "temperature and strain insensitive bending measurements with D-type fiber Bragg gratings", *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, 7, pp.829-833, 2001.
245. Boming Zhang, Zhanjun Wu, Dianfu Wang and Shanyi Du, "Investigation of multifunctional fiber optic sensor in smart composite", *Opt. Eng.*, vol. 40 (4), pp.612-617, 2001.
246. Hiroaki Tsutsui, Akio Kawamata, Tomio Sanda and Nobuo Takeda, "Detection of impact damage of stiffened composite panels using embedded small-diameter optical fibers", *Smart Materials and Structures*, vol. 13, pp.1284-1290, 2004.
247. Yang Zhao, Farhad Ansari, "Embedded fiber optic sensor for characterization of interface strains in FRP composite, *Sensors and Actuators A*, vol. 100, (2-3), pp.247-251, 2002.
248. Nobuhira Tanaka, Yoji Okabe, Nobuo Takeda, "Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates", *Smart Materials and Structures*, vol. 12, pp.940-946, 2003.
249. J. W. Berthold. "Historical review of microbend fiber-optic sensors". *J. Ligthwave Technology*, vol. 13 (10), pp.1193-1199, 1995.
250. J. S. Sirkis and C. E. Taylor, "Interferometric-fibre-optic strain sensor ", *Exp. Mech.* 28, pp.170-176, 1988.
-

- 251. T. Valis D. Hogg, R. M. Measures, "Fibre optic Fabry – Perot strain rosettes", *Smart Mater. Struct.* 1, p.227-232, 1992.
- 252. S. Magne, S. Rougeault, M. Vilela, and P. Ferdinand, "State – of – strain evaluation with fiber Brag grating rosettes: application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors", *Appl. Opt.* 36, pp.9437-9447, 1997.
- 253. [www.vishay.com](http://www.vishay.com)
- 254. P. Ferdinand, S. Magne, S. Rougeault, M. Vilela, "Rosette – type optical microsystem of strain gauges having dielectric guides for measuring a longitudinal strain in a planar structure", United States Patent, 1998.
- 255. P. Ferdinand, S. Magne, S. Rougeault, M. Vilela, "State-of-strain evaluation with fiber Bragg grating rosettes: application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors", *Applied Optics*, Vol. 36, 36, 1997.
- 256. M. Ishihara, N. Noda, "Dynamic behavior of a piezothermoelastic laminate considering the effect of transverse shear", *Smart Mater. Struct.* II, pp.202-208, 2002.
- 257. M.W. Hooker, "Properties of PZT-Based Piezoelectric Ceramics Between -150° and 250°C", NASA/CR-1998-208708, 1998.
- 258. D.B. Koconis, L.P. Kollar, and G.S. Springer, "Shape Control of Composite Plates and Shells with Embedded Actuators, II. Desired Shape Specified," *Journal of Composite Materials*, 28, 3, pp.262-85, 1994.
- 259. S. Blatcher, "Holographic interferometric analysis of femoral prostheses", Tese de Douturamento em Interdisciplinary Research Centre in Biomedical Materials, Queen Mary and Westfield College, University of London, 1995.
- 260. J. A. Guedes, "Estudo numérico e experimental da biomecânica do fémur intacto e com prótese de anca inserida", Tese de Mestrado em Engenharia Biomédica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001.